

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ
КАФЕДРА ПРОМИСЛОВОЇ ЕЛЕКТРОНІКИ**

«На правах рукопису»
УДК 621.314

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ Ю.С. Ямненко
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ _____ ” _____ 2018 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності _____ 171 Електроніка
(код і назва)

спеціалізації _____ Електронні компоненти і системи

на тему: «Метод керування кроковим двигуном з мінімальним рівнем пульсації»

Виконав: студент _____ II _____ курсу, групи _____ ДС-71мп
(шифр групи)

Можаровський Дмитро Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник _____ проф., д.т.н., Жуйков В.Я. _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали) (підпис)

Консультант з технічного розділу _____ доц., к.т.н., Вербицький Є.В. _____
(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали) (підпис)

Рецензент проф., _____ к.т.н Кузьмичєв Анатолій Іванович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали) (підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Київ – 2018 року

**Національний технічний університет України
“Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського”**

Факультет електроніки
(повна назва)

Кафедра промислової електроніки
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо - професійною програмою

Спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва)

Спеціалізація Електронні компоненти і системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

Ю.С. Ямненко

(підпис) (прізвище ініціали)

«03» вересня 2018 року

**З А В Д А Н Н Я
НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ СТУДЕНТУ**

Можаровському Дмитру Олександровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту «Метод керування кроковим двигуном з мінімальним рівнем пульсацій»

науковий керівник дисертації Жуйков Валерій Якович, д.т.н., проф..
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2018 року № 4114-с

2. Строк подання студентом проекту 6-го грудня 2018 року

3. Об'єкт дослідження метод керування кроковим двигуном зі зменшеною пульсацією моменту

4. Предмет дослідження (вихідні дані для магістерської дисертації за освітньо-професійною програмою) Система керування кроковим двигуном з мінімальною величиною пульсації моменту на виході.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Проаналізувати основні методи керування кроковим двигуном. 2. Дослідити спектри сигналів керування кроковим двигуном. 3. Розробити модель формування сигналу. 4.

Проаналізувати та обрати найоптимальніший метод керування кроковим двигуном

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу Модель формування сигналів для різних методів керування, слайди презентації.

7. Орієнтовний перелік публікацій

1) Можаровський Д.О. Бездротова передача та обробка інформації для системи SmartGrid/ Збірник статей XI міжнародної науково-технічної конференції молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2018». Секція “Перетворювальна та мікропроцесорна техніка”, 2018.- с. 316-319.

2) Можаровський Д. О. Ямненко Ю.С. Первинна обробка та ідентифікація біотелеметричної інформації з датчика пульсу . / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. – 2018. – С. 116–121.

8. Консультанти розділів дисертації

| Розділ | Прізвище, ініціали та посада консультанта | Підпис, дата | |
|--------|---|----------------|------------------|
| | | завдання видав | завдання прийняв |
| 1-3 | <u>Вербицький Є. В</u> | | |

9. Дата видачі завдання «03» вересня 2018 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

| № з/п | Назва етапів виконання дипломного проекту | Строки виконання етапів проекту | Примітка |
|-------|--|---------------------------------|----------|
| 1 | Огляд літератури | 1.09.2018-24.09.2018 | виконано |
| 2 | Аналіз методів формування струму в обмотках двигуна | 25.09.2018-12.10.2018 | виконано |
| 3 | Дослідження спектрів сигналів струмів обмоток крокового двигуна. | 13.10.2018-27.10.2018 | виконано |
| 4 | Моделювання методів формування струму та їх подальший аналіз | 28.10.2018-20.11.2018 | виконано |
| 5. | Порівняння методів формування модуляції струмів обмоток. | 21.11.2018-26.11.2018 | виконано |
| 6. | Розробка стартап-проекту | 26.11.2018 – 03.12.2018 | виконано |

Студент

Керівник проекту

(підпис)

(підпис)

Можаровський Д.О.

(ініціали, прізвище)

Жуйков В.Я.

(ініціали, прізвище)

АНОТАЦІЯ

Метою представленої магістерської дисертації є аналіз існуючих методів керування кроковим двигуном та розробка алгоритму постійного по величині моменту з мінімальним рівнем пульсації. Було проведено комп'ютерне моделювання запропонованих методів керування кроковим двигуном та їх подальша обробка та аналіз, з метою виявлення найбільш доцільного алгоритму керування з точки зору пульсацій моменту. Побудовані осцилограми струмів керування, їх спектри та сумарний момент двигуна. Для порівняння їх між собою застосовувалося середньоквадратична похибка та час зміни полярності струму, що впливає на величину пульсацій моменту. Реалізовано метод ШІМ зі змінною частотою несучої функції для забезпечення постійного коефіцієнту пульсації струму. Практична цінність роботи полягає у забезпеченні моменту двигуна на рівні 5% і менше.

Ключові слова: кроковий двигун, пульсація моменту, алгоритм керування.

АННОТАЦИЯ

Целью представленной магистерской диссертации является анализ существующих методов управления шаговым двигателем и разработка алгоритма постоянного по величине момента с минимальным уровнем пульсации. В работе проведено компьютерное моделирование предложенных методов управления шаговым двигателем и их дальнейшая обработка и анализ, с целью определения наиболее целесообразного алгоритма управления с точки зрения пульсации момента. Было построено осциллограммы токов управления, их спектры и суммарный момент двигателя. Для сравнения их между собой применялась среднеквадратичная погрешность и время изменения полярности тока, которая влияет на

величину пульсации момента. Реализовано метод ШИМ с переменной частотой несущей функции для обеспечения постоянного коэффициента пульсации тока. Практическая ценность работы заключается в обеспечении момента двигателя на уровне 5% и менее.

Ключевые слова: шаговый двигатель, пульсация момента, алгоритм управления.

ANNOTATION

The method is presented by the magistracy dissertation, an analysis of the most common methods control with stepper motor and the development of the algorithm according to the minimum level summary pulsation on torque. In the work a computer modeling of the proposed stepping motor control methods and their further processing and analysis was conducted, with the purpose of determining the most appropriate control algorithm from the point of view of torque pulsation. The oscillograms of control currents, their spectra and the total engine moment were constructed. For comparison, the mean square error and the time of change in the current polarity, which affects the momentum pulsation, was used among them. A PWM method with a variable frequency carrier function was implemented to provide a constant current pulsation coefficient. The practical value of the work is to provide an engine moment at 5% or less.

Keywords: stepping motor, pulsation of moment, control algorithm.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП | 7 |
| 1. ОСНОВНІ ВИДИ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ ТА МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ..... | 10 |
| 1.1. Крокові двигуни..... | 10 |
| 1.1.1 Двигун з постійними магнітами..... | 10 |
| 1.1.2 Двигун із змінним магнітним опором..... | 15 |
| 1.1.3 Гібридний кроковий двигун..... | 15 |
| 1.1.4 Біполярні та уніполярні двигуни..... | 16 |
| 1.1.5 Способи підключення обмоток крокового двигуна..... | 17 |
| 1.2. Методи керування кроковим двигуном..... | 23 |
| 1.2.1 Повнокроковий режим без перекриття фаз..... | 23 |
| 1.2.2 Повнокроковий режим з перекриттям фаз..... | 25 |
| 1.2.3 Напівкроковий режим..... | 26 |
| 1.2.4 Мікроковий режим..... | 30 |
| 1.3. Вплив навантаження та тертя на момент двигуна..... | 33 |
| 1.3.1 Вплив навантаження на момент двигуна..... | 33 |
| 1.3.2 Вплив тертя на момент двигуна..... | 35 |
| 1.4. Резонанс крокового двигуна..... | 38 |
| Висновки до першого розділу | 40 |
| 2. ОПИС МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ..... | 42 |
| 2.1 Дослідження спектрів сигналів..... | 47 |
| 2.2 Способи зміни напрямку струму в кроковому двигуні..... | 52 |
| 2.3 Стабілізація струму..... | 56 |
| Висновки до другого розділу..... | 59 |
| 3. ВИБІР МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ..... | 61 |
| 3.1 ШІМ керування..... | 61 |

| | |
|--|-----------|
| 3.1.1 Основні характеристики ШІМ сигналу. | 61 |
| 3.1.2 Формування ШІМ для аналогових сигналів..... | 63 |
| 3.1.3 Формування двополярної вихідної напруги..... | 66 |
| 3.2 Релейне керування кроковим двигуном..... | 69 |
| 3.3 Аналіз струму керування кроковим двигуном та сумарного моменту..... | 70 |
| Висновки до третього розділу..... | 75 |
| 4. РОЗРОБКА СТАРТАП - ПРОЕКТУ..... | 77 |
| 4.1 Опис ідеї проекту..... | 79 |
| 4.2 Технологічний аудит проекту..... | 81 |
| 4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту..... | 81 |
| 4.4 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту..... | 85 |
| Висновки до четвертого розділу..... | 87 |
| ВИСНОВКИ..... | 88 |
| СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... | 89 |
| Додаток А. Лістинг програми для побудови спектрів сигналу..... | 92 |
| Додаток Б. Лістинг програми для обчислень середньоквадратичної похибки..... | 93 |
| ABSTRACT..... | 95 |

ВСТУП

Актуальність роботи. В сучасних системах керування широке використання мають прилади з цифровою обробкою сигналу. Цифрові системи керування призвели до створення нового типу виконавчих механізмів - крокових двигунів, які широко застосовуються в принтерах, дисководах, факсах та в різних промислових обладнаннях, де досить важливим фактором виступає точне позиціонування приладу.

Основними методами керування кроковими двигунами є: повнокроковий, напівкроковий та мікрокроковий режими. Ці режими роботи мають виконувати комутацію обмоток двигуна під час його роботи.

Режим керування двигуном обирається в залежності від практичного завдання, яке необхідно реалізувати. Після вибору режиму, слід обрати та реалізувати алгоритм керування обмотками крокового двигуна. Основним параметром, за допомогою якого можна проаналізувати алгоритм керування - є момент двигуна, який для стабільної роботи має мати постійне значення в обмотці та мінімальну величину пульсації. Проблемою відомих на сьогодні алгоритмів керування є те, що момент двигуна не є постійним, має досить суттєву величину пульсацій моменту на виході, внаслідок чого точне позиціонування приладу є неможливим. Тому створення методу керування кроковим двигуном з мінімальною величиною пульсації вихідного моменту є актуальною задачею на сьогоднішній день.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами

Робота виконана в Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут» на кафедрі промислової електроніки в рамках ініціативної науково-дослідницької роботи.

Мета і завдання досліджень. Метою дисертації є аналіз існуючих методів керування кроковим двигуном та розробка алгоритму постійного по величині моменту з мінімальним рівнем пульсації.

Основними задачами досліджень є :

- 1) проведення комп'ютерного моделювання запропонованих методів ;
- 2) обробка та аналіз результатів експериментальних даних, отриманих внаслідок моделювання, з метою виявлення найбільш доцільного алгоритму керування з точки зору пульсацій моменту.

Предмет дослідження - спосіб зменшення пульсації моменту

Об'єкт дослідження - метод керування кроковим двигуном зі зменшеною пульсацією моменту.

Методи дослідження. При розв'язанні поставлених у роботі задач для реалізації методу керування кроковим двигуном з мінімальним рівнем пульсації обертового моменту використалася теорія електричних кіл та теорія інформаційної обробки сигналів з використанням математичних мір подібності для їх подальшого аналізу . Моделювання системи та її аналіз проводилися в програмному пакеті Matlab Simulink.

Наукова новизна досліджень полягає в наступному:

- 1) розроблено метод керування кроковим двигуном зі зменшеною пульсацією ;
- 2) запропоновано метод ШІМ модуляції зі змінною частотою несучої функції для забезпечення постійного коефіцієнта пульсації струму.

Практична цінність отриманих результатів:

- 1) Забезпечено момент пульсації двигуна на рівні 5 відсотків і менше
- 2) Мінімізовано динамічні втрати транзистора інвертора за рахунок зміної частоти несучої функції ШІМ.

Апробація результатів роботи. Результати дисертаційних досліджень доповідалися та обговорювалися на XI Міжнародній науково-технічній конференції молодих вчених «Електроніка-2018», Київ .

Публікації. Основні положення і результати, отримані в дисертаційній роботі, були описані в наступних роботах:

1. Можаровський Д.О. Бездротова передача та обробка інформації для системи SmartGrid/ Збірник статей XI МІЖНАРОДНОЇ НАУКОВО-ТЕХНІЧНОЇ конференції молодих вчених «ЕЛЕКТРОНІКА-2018». Секція “Перетворювальна та мікропроцесорна техніка”, 2018.- с. 316-319.

2. Можаровський Д. О. Ямненко Ю.С. Первинна обробка та ідентифікація біотелеметричної інформації з датчика пульсу . / Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І.Вернадського. – 2018. – С. 116–121.

Структура та обсяг дисертації. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел із 21 найменувань Загальний обсяг дисертаційної роботи становить 97 сторінок, у тому числі 81 сторінок основного тексту 51 рисунків та 21 таблиці.

1. ОСНОВНІ ВИДИ КРОКОВИХ ДВИГУНІВ ТА МЕТОДИ КЕРУВАННЯ ДВИГУНАМИ

1.1 Крокові двигуни

Крокові двигуни складаються із рухомої частини, яка має назву ротор, та нерухомої, яка називається статор. На статорі встановлюються електромагніти, а частини ротора, які взаємодіють з електромагнітами, виконуються із магнітотвердого або магнітом'якого матеріалу [1].

Відповідно до того, з якого матеріалу виконано ротор двигуна, вони розділяються на наступні види :

- двигун із постійними магнітами ;
- двигун із змінним магнітним опором ;
- гібридний двигун ;
- біполярні та уніполярні двигуни.

1.1.1 Двигун із постійними магнітами

На рис 1.1 зображено конструкцію крокового двигуна з постійними магнітами.

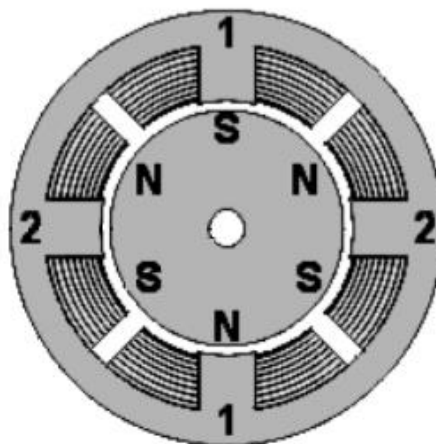


Рис 1.1 Кроковий двигун з постійними магнітами

Показаний на рис 1.1 двигун має в своїй конструкції три пари полюсів ротора та дві пари полюсів статора [1].

Принцип дії такого двигуна полягає в тому, що при включенні в одну з його катушок струму, ротор робить оберт таким чином, щоб його різнойменні полюси та полюси статора знаходилися навпроти один одного.

Для розгляду принципу роботи такого двигуна, прийmemo, що ротор робить оберт на 90 градусів, якщо подавати імпульс струму на обмотки статора.

На рис 1.2 зображено принципова схема роботи крокових двигунів.

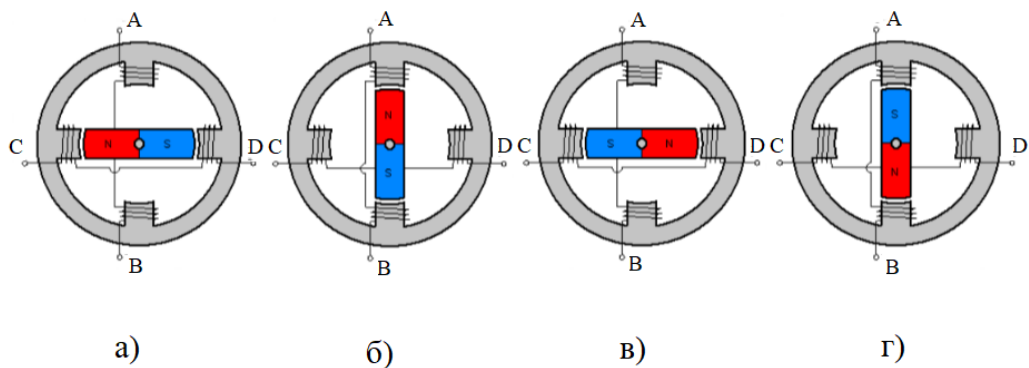


Рис 1.2 Принципова схема роботи крокового двигуна

Коли через обмотку CD буде протікати струм, то в статорі буде створюватися магнітне поле. При цьому, при взаємодії полів статора та ротора створюється момент, завдяки якому ротор робить оберт таким чином, щоб осі їх магнітних полів співпадали [1]. Магнітний потік при цьому буде максимальним. Завдяки цьому, кроковий двигун робить один крок і займе положення стійкої рівноваги, що і показано на рис 1.2 а).

Обмотка CD після цього буде знеструмлена і струм буде протікати через обмотку AB. Ротор двигуна вийде з положення стійкої рівноваги завдяки моменту, завдяки якому він і робить наступний оберт. При знеструмленні обмотки AB, ротор знову буде знаходитися в положенні стійкої рівноваги.

Далі, двигун знову підключений до обмотки CD, проте він має іншу полярність ротора , тому і полярність обмоток має змінитися на протилежну. Коли це буде зроблено, двигун зробить ще один крок, який зображено на рис 1.2 г). Ротор двигуна буде знаходитися при цьому між обмотками АВ, через які має протікати струм протилежної полярності для повернення ротора в положення , яке зображене на рис 1.2 а) [2].

Такі двигуни роблять за оберт від 24 до 48 кроків, при цьому оберт складає від 15 до 7.5 градусів відповідно.

На рис 1.3 зображено розріз крокового двигуна з постійними магнітами [2].

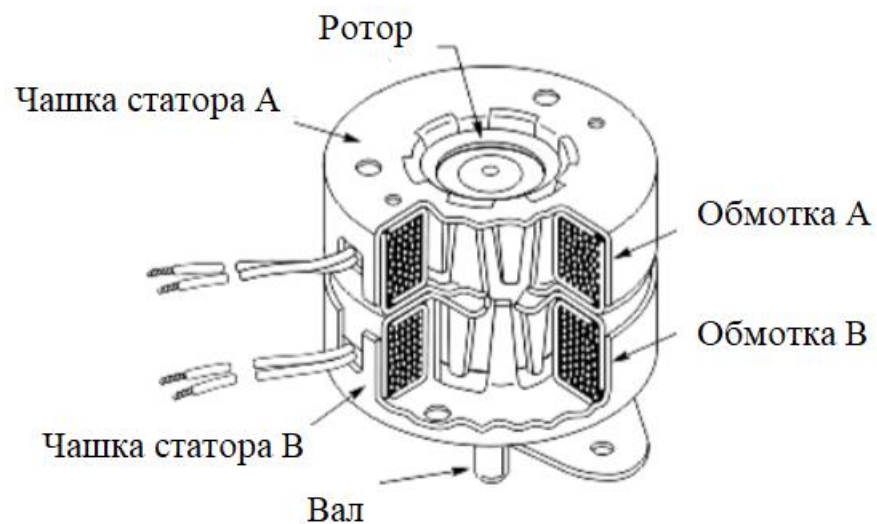


Рис 1.3 Розріз крокового двигуна з постійними магнітами

Магнітопровід статора виконаний у вигляді штампованого стакану, з метою здешевлення конструкції. Фазові обмотки розміщені на двох різних магнітопроводах , які розташовані один на одній. Ротор в свою чергу являє собою циліндричний многополюсний постійний магніт [3].

Перевагами такого двигуна є :

- Регулювання струму керування, що дає можливість двигуну працювати в оптимальному режимі при впливі реактивної енергії.
- Висока перевантажувальна здатність. Шляхом підвищення струму збудження, можна провести значне підвищення перевантажувальної

здатності. Це відбувається на момент різкого і короткочасного виникнення додаткового навантаження на вихідному валу.

- Швидкість обертання двигуна є незмінною при підключенні любого типу навантаження , якщо він не перевищує показника перевантажувальної здатності.

Недоліком такого типу двигунів є вплив зворотної ЕРС зі сторони ротора, яка обмежує їх максимальну швидкість. Для роботи на великих швидкостях використовується двигуни із змінними магнітами [3-4].

1.1.2 Двигун із змінними магнітним опором

На рис 1.3 зображений кроковий двигун із змінним магнітним опором , що конструктивно має 4 зубці на роторі і 6 полюсів на статорі. Для розгляду принципу роботи двигуна, обмотки під'єднано до джерела напруги за допомогою ключів, з метою їх комутації.

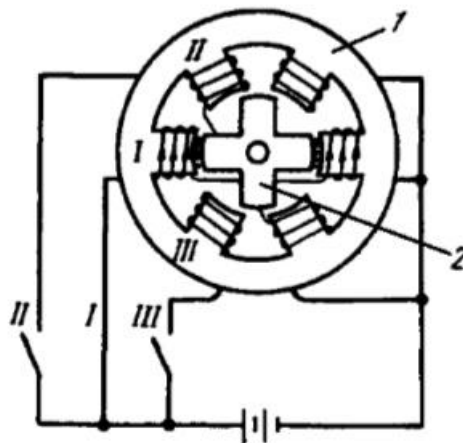


Рис 1.3 Двигун із змінним магнітним опором : 1 - сердечник статора , 2 - сердечник ротора

В такому типі двигунів є три незалежні одна від одної обмотки , кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора. Обмотка I підключена до джерела живлення через ключ I , причому саме через цей ключ в даному випадку іде комутація. Струм, протікаючи в обмотці, створює магнітний потік [5]. Оскільки сердечник статора і ротора

виконані із магнітом'яких матеріалів , то ротор намагається зайняти таке положення , при якому два із чотирьох його зубців будуть розташовуватися на одній прямій з зубцями статора.

Якщо потім розімкнути фазу I і замкнути фазу II , в зубцях статора , відповідний цій фазі , виникає магнітний потік [5].Зубці ротора , намагнічені полем, будуть притягуватися к зубцям статора , поки не окажуться з ними на одній лінії. В результаті цього, ротор двигуна повернеться на кут 30 градусів , що і буде кроком двигуна. Таким чином, якщо через ключі комутувати фази, можна керувати кутовим положенням ротора. Швидкість обертання валу буде визначатися частотою комутації фаз, а напрямок буде залежати від того, в якому порядку буде відбуватися зміна фаз. Так, якщо після I фази скомутувати II , то ротор буде обертатися проти годинникової стрілки, а якщо II, то за нею. Для того, щоб визначити кут, на який повертається двигун , можна застосувати формулу 1.1 :

$$\theta_s = \frac{360}{N_r * m}, \quad (1.1)$$

де N_r - кількість зубців ротора, m - число фаз.

Опираючись на цю формулу , для того щоб зменшити крок двигуна, необхідно або збільшити кількість фаз, або кількість зубців ротора, або все разом.

Нехай в двигуні буде протікати струм через одну обмотку. Тоді два зубці ротора розташовані на одній прямій з двома зубцями статора. Якщо до валу ротора буде прикладено зовнішній момент, то при цьому виникає утримуючий момент , який перешкоджає виведенню ротора із положення рівноваги. Цей процес зображено на рис 1.4 .

В результаті викривлення магнітних силових ліній в них виникає натяг, під дією якого силові лінії прагнуть стати коротшими та прямішими.

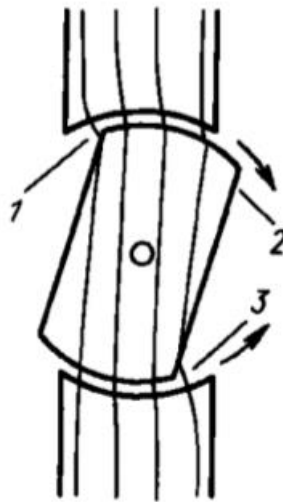


Рис 1.4 Моменти , що діють на ротор : 1 - силові лінії, 2 - зовнішній момент ,
3 - утримуючий момент

1.1.3 Гібридний кроковий двигун

На рис 1.5 зображена конструкція такого двигуна, де 1 - магнітопровід статора ; 2 - обмотка ; 3 - магнітопровід ротора ; 4 - обмотка ; 5 - постійний магніт.

Гібридний двигун за своєю конструкцією складається з елементів двигуна із змінним магнітним опором та двигуна з постійним магнітом.

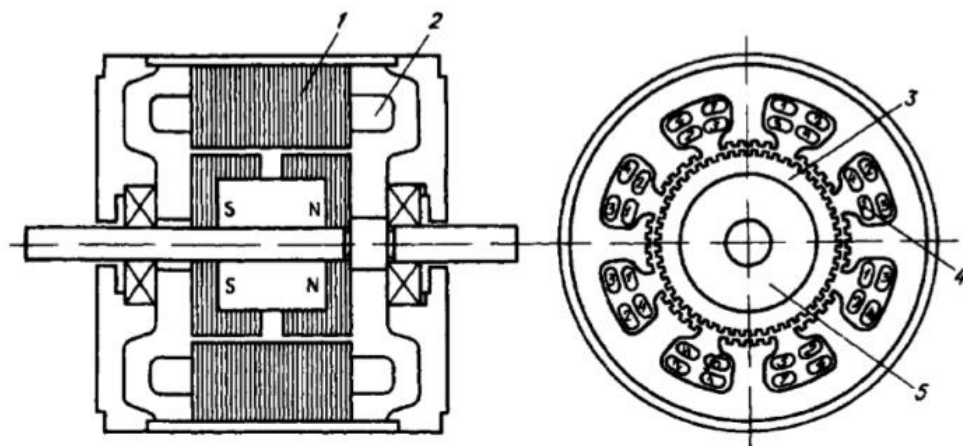


Рис 1.5 Конструкція гібридного двигуна

Ротор такого двигуна складається з двох частин, зубці однієї з них є північним полюсом магніта, а іншої половини- південним. Крім того,

нижні та верхні зубці ротора повернуті один відносно одного на величину , рівну половині кута кроку зубців, що дозволяє зменшити крок двигуна. Зубці ротора забезпечують менший опір магнітного кола в певних положеннях ротора , що підвищує статичний та динамічний момент [6]. Це досягається за рахунок відповідного розташування зубців, коли частина зубців ротора знаходиться строго навпроти зубців статора , а частина між ними.

Завдяки такому двигуну можна керувати кроком ротора в діапазонах від 1.8 до 0.9 градусів, при використанні 8 основних полюсів статора і 3.6 градусів при використанні 4 полюсів.

Гібридні крокові двигуни є дорожчими серед усіх типів таких двигунів, проте вони мають меншу величину кроку ,більшу швидкість та більший момент у порівнянні з іншими двигунами [7]. Число кроків за оберт складає від 100 до 400 , що відповідає діапазону кутів 3.6 -0.9. Такі двигуни є мають у своїй конструкції всі плюси, які є у двох попередніх двигунів.

1.1.4 Біполярні та уніполярні двигуни

В залежності від кількості обмоток, двигуни поділяються на біполярні , уніполярні та чотирьохобмоточні. На рис 1.6 зображено різні види двигунів , в залежності від кількості обмоток.

Біполярний двигун складається з двох обмоток , при чому одна обмотка знаходиться в одній фазі. Для комутації таких обмоток слід змінювати напрям магнітного поля за допомогою системи керування. Для керування біполірними двигунами використовують різноманітні мостові та полумостові драйвери [7].

Чотирьохобмоточний двигун складається із 4 пар обмоток, при цьому при різних комутація цих обмоток його можна використовувати як біполярний або як уніполярний двигун.

Уніполярні двигуни також мають дві обмотки , причому кількість виводів двигуна може складати 5 або 6. У кожної обмотки є один вивід, що знаходиться посередині. Кількість цих виводів залежить від того, з'єднані ці виводи між собою всередині двигуна чи кожен центральний вивід є незалежним один від одного. При такій конструкції значно простіше змінювати напрям струму в обмотках крокового двигуна, внаслідок чого значно простіше змінювати напрям струму в обмотках крокового двигуна , що спрощує реалізацію системи керування кроковим двигуном [8].

Перевагою такого типу двигунів є їх простота реалізації системи керування ними, що дає широке використання таких двигунів у промисловості. Недоліком такої конструкції є більш низький момент чим у біполярного двигуна при тих самих розмірах.

На рис 1.6 зображені види крокових двигунів в залежності від кількості обмоток.

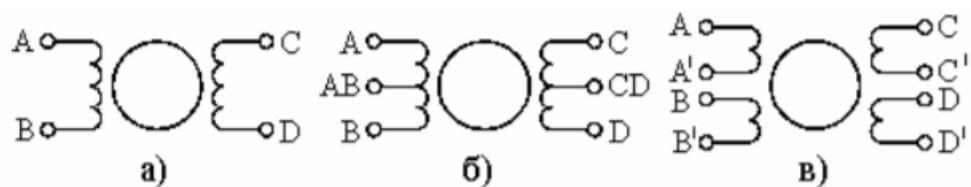


Рис 1.6 Види двигунів по обмоткам : а) біполярний ; б) уніполярний ; в) чотирьохполюсний;

1.1.5 Способи підключення обмоток крокового двигуна

Для підключення крокового двигуна з 6 обмотками до драйверу керування можна застосовувати два наступні способи :

- Уніполярний ;
- Біполярне послідовне з'єднання обмоток двигуна ;

Для підключення крокового двигуна з 8 обмотками до драйверу керування можна застосовувати наступні три способи :

- уніполярний ;

- біполярне послідовне з'єднання обмоток двигуна ;
- біполярне паралельне з'єднання обмоток двигуна ;

Кожен вивід двигуна з'єднаний дротом певного кольору. На рис.1.7 зображено уніполярний спосіб під'єднання крокового двигуна.

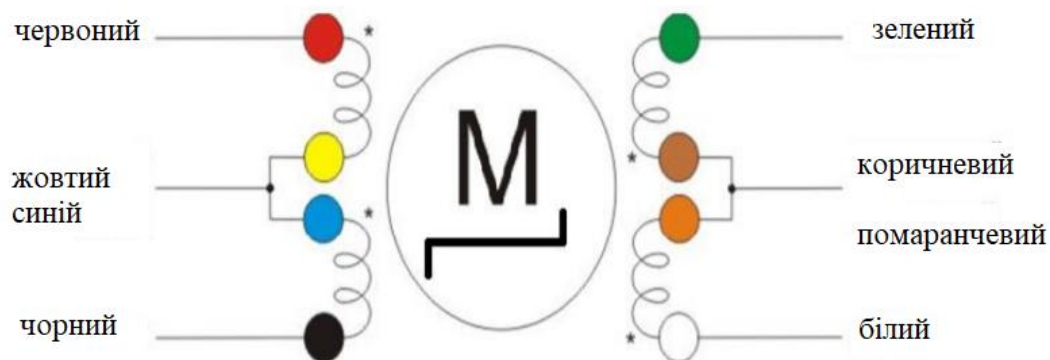


Рис 1.7 Уніполярний спосіб підключення обмоток крокового двигуна

При підключенні та керуванні всіх обмоток двигуна електричні характеристики двигуна, до яких відносять струм обмотки, її опір, індуктивність, обертовий момент відповідають номінальним значенням. Таке підключення найбільш ефективне на середніх швидкостях з усього діапазону робочих швидкостей [9-10].

На рис 1.8 зображено біполярне послідовне з'єднання обмоток двигуна.

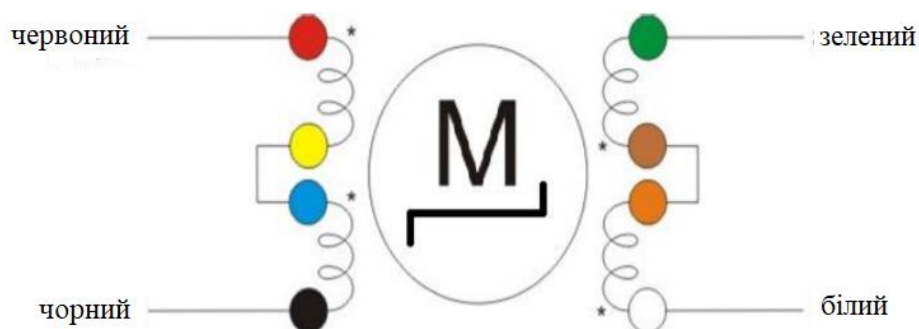


Рис 1.8 Біполярне послідовне включення обмоток крокового двигуна

Такий тип підключення найкраще підходить для низьких швидкостях з робочого діапазону та має певні обмеження для керування.

Струм, що підключається до обмоток цього двигуна має бути зменшений в $\sqrt{2}$ разів.

Номінальний робочий струм, що вказаний в технічній документації до двигуна, розрахований на опір однієї обмотки. При послідовному включенні обмоток, загальний опір збільшиться в два рази і становитиме $2R$ [10].

Споживана потужність при уніполярному підключенні визначається за наступним співвідношенням :

$$P_{yn} = I_{yn}^2 R,$$

де P_{yn} - потужність крокового двигуна при уніполярному способі підключенні обмоток, I_{yn} - струм в обмотці крокового двигуна при уніполярному способі підключення обмоток, R - опір обмотки.

При біполярному послідовному підключенні обмоток споживана потужність визначається таким співвідношенням :

$$P_{bn} = I_{bn}^2 R,$$

де P_{bn} - потужність крокового двигуна при біполярному способі підключенні обмоток, I_{bn} - струм в обмотці крокового двигуна при біполярному способі підключення обмоток, R - опір обмотки.

Споживана потужність не залежить від типу підключення двигуна, тому :

$$P_{yn} = P_{bn} = I_{yn}^2 R = I_{bn}^2 2R,$$

Звідки величину струму для біполярного послідовного включення можна знайти за формулою 1.2 .

$$I_{bn} = \frac{I_{yn}}{\sqrt{2}}. \quad (1.2)$$

Так як обертовий момент двигуна є величиною прямопропорційною до величини магнітного поля, що створюється в його обмотках, то він збільшується при збільшенні числа витків обмотки і зменшується при спаді величини струму, що проходить через обмотки. Оскільки струм

зменшився в $\sqrt{2}$ разів, а число витків при цьому збільшилося в два рази, то обертовий момент збільшиться в $\sqrt{2}$ разів [10]. Залежність обертового моменту для біполярного послідовного підключення та уніполярного наведено формулою 1.3.

$$M_{\text{бп}} = 1.4M_{\text{ун}}, \quad (1.3)$$

де $M_{\text{бп}}$ - момент, що створюється на валу крокового двигуна з біполярним послідовним підключенням, а $M_{\text{ун}}$ - момент, що створюється на валу крокового двигуна з уніполярним підключенням обмоток.

Характеристики двигуна при паралельному біполярному підключенні наведені в табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Характеристики крокового двигуна при послідовному біполярному включенні

| Параметр | Значення |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Струм обмотки | $I_{\text{бп}} = 0.707I_{\text{ун}}$ |
| Опір обмотки | $R_{\text{бп}} = 2R_{\text{ун}}$ |
| Індуктивність обмотки | $L_{\text{бп}} = L_{\text{ун}}$ |
| Обертовий момент | $M_{\text{бп}} = 1.4M_{\text{ун}}$ |

На рис 1.9 зображено біполярне паралельне з'єднання обмоток двигуна.

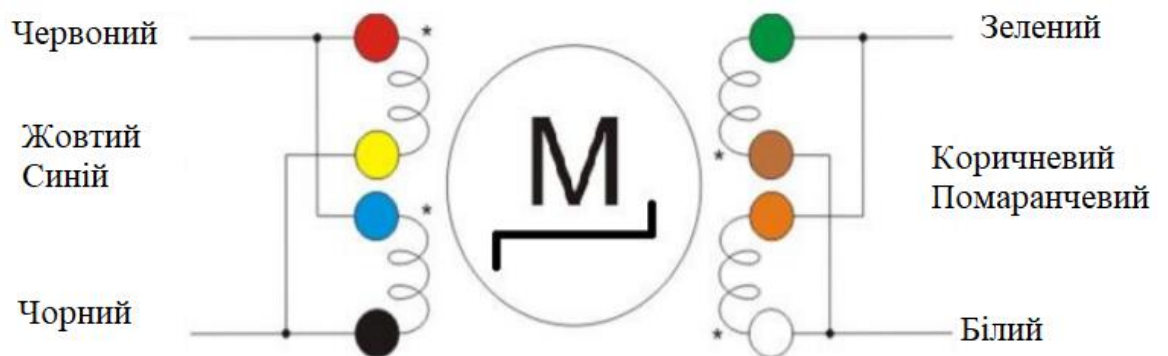


Рис 1.9 Біполярне паралельне включення обмоток крокового двигуна

Такий тип підключення найкраще підходить для високих швидкостей робочого діапазону.

Струм, що підключається до обмоток цього двигуна має бути збільшений в $\sqrt{2}$ разів. Наприклад, якщо номінальний струм двигуна складає 3 А, то при паралельному включенні на обмотки слід подавати струм 4.2 А.

Номінальний робочий струм, що вказаний в технічній документації до двигуна, розрахований на опір однієї обмотки. При паралельному включенні обмоток, загальний опір зменшиться в два рази [12].

Споживана потужність при біполярному паралельному включенні обмоток визначатиметься за наступним співвідношенням :

$$P_{\text{бп}} = 0.5 I_{\text{бп}}^2 R ,$$

де $P_{\text{бп}}$ - потужність крокового двигуна при уніполярному способі підключенні обмоток, $I_{\text{бп}}$ - струм в обмотці крокового двигуна при уніполярному способі підключення обмоток , R - опір обмотки [12-13].

Споживана потужність не залежить від типу підключення двигуна, тому :

$$P_{\text{ун}} = P_{\text{бп}} = I_{\text{ун}}^2 R = 0.5 I_{\text{бп}}^2 R .$$

Звідки величину струму для біполярного послідовного включення можна знайти

$$I_{\text{бп}} = \sqrt{2} I_{\text{ун}} . \quad (1.4)$$

Так як обертовий момент двигуна є величиною прямопропорційною до величини магнітного поля, що створюється в його обмотках, то він збільшується при збільшенні числа витків обмотки і зменшується при спаді величини струму , що проходить через обмотки. Оскільки струм зменшився в $\sqrt{2}$ разів, а число витків при цьому збільшилося в два рази, то обертовий момент збільшиться в $\sqrt{2}$ разів. Залежність обертового моменту для біполярного послідовного підключення та уніполярного

$$M_{\text{бп}} = 1.4 M_{\text{ун}} , \quad (1.5)$$

де $M_{\text{бп}}$ - момент, що створюється на валу крокового двигуна з біполярним послідовним підключенням, а $M_{\text{ун}}$ - момент, що створюється на валу крокового двигуна з уніполярним підключенням обмоток [13].

Характеристики двигуна при паралельному біполярному підключенні наведені до табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Характеристики крокового двигуна при паралельному біполярному включенні

| Параметр | Значення |
|-----------------------|------------------------------------|
| Струм обмотки | $I_{\text{бп}} = 1.4I_{\text{ун}}$ |
| Опір обмотки | $R_{\text{бп}} = 0.5R_{\text{ун}}$ |
| Індуктивність обмотки | $L_{\text{бп}} = 4L_{\text{ун}}$ |
| Обертний момент | $M_{\text{бп}} = 1.4M_{\text{ун}}$ |

В табл 1.3 зведено всі можливі способи підключення обмоток двигуна , наведено їх переваги та недоліки та максимальна ефективність використання.

Таблиця 1.3

Порівняльна характеристика способів підключення крокового двигуна

| Параметр | Уніполярне | Послідовне | Паралельне |
|--------------------------|---|--|--|
| Переваги/недоліки | Середній момент при середньому енергоспоживанні | Високий момент при високому енергоспоживанні | Високий момент на низьких швидкостях при низькому енергоспоживанні |
| Максимальна ефективність | Середній швидкісний діапазон | Високошвидкісний діапазон | Низькошвидкісний діапазон |

Залежність моменту двигуна при різних способах підключення наведена на рис 1.10 .

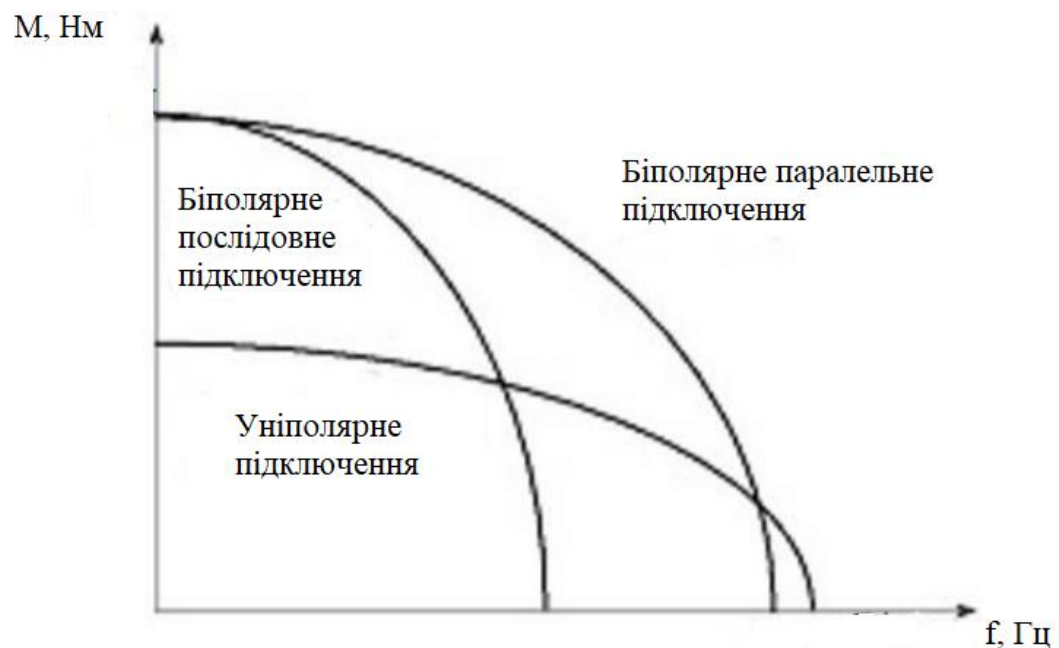


Рис 1.10 Залежність моменту крокового двигуна від частоти

1.2 Методи керування кроковими двигунами

Основними методами керування кроковими двигунами є :

- повнокроковий режим без перекриття фаз ;
- повнокроковий режим з перекриттям фаз ;
- напівкроковий режим ;
- мікрокроковий режим .

1.2.1 Повнокроковий режим без перекриття фаз

Даний метод забезпечує почергову комутацію фаз, тобто в один момент часу комутація проходить тільки через одну фазу, а в інший момент часу через іншу. На рис 1.11 зображено приклад повнокрокового режиму без перекриття фаз [13].

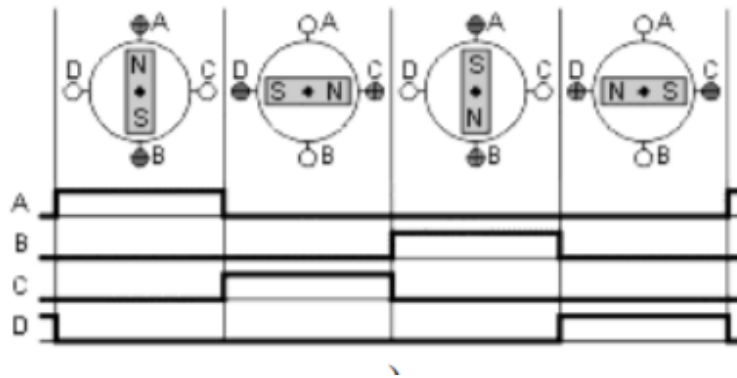


Рис 1.11 Повнокроковий режим без перекриття фаз

Ротор двигуна займає положення навпроти обмотки, через яку протікає струм. До табл. 1.4 занесено порядок збудження фаз при повнокроковому режимі без перекриття фаз .

Таблиця 1.4

Повнокроковий однофазний режим

| Фаза | Початок | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|---------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фаза 1 | * | | | * | | | * | | |
| Фаза 2 | | * | | | * | | | * | |
| Фаза 3 | | | * | | | * | | | * |

Зірочки позначають збуджену фазу, а пусті клітинки - знеструмлену. При такому порядку подачі струму на фази кроковий двигун буде обертатися за годинниковою стрілкою.

Перевагою такого способу керування є простота його реалізації в системі керування. До недоліків відносять те, що таким способом рух ротора двигуна буде не плавним, ривковим. Окрім в двигунах буде застосовуватись не всі обмотки : для біполярного двигуна з таким способом керування використовуватиметься лише 50 % обмоток, а в уніполярному 25 %. Це призведе до того, що таким способом неможливо отримати повний момент двигуна [13-14].

1.2.2 Повнокроковий режим з перекриттям фаз

При цьому способі керування ротор двигуна фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора і забезпечує в $\sqrt{2}$ разів більший момент. Такий спосіб керування двигуном забезпечує такий самий кут кроку, як і в першому способі, проте положення точок рівноваги ротора зміщено на півкроку.

Часові діаграми керування в такому режимі зображені на рис 1.12 .

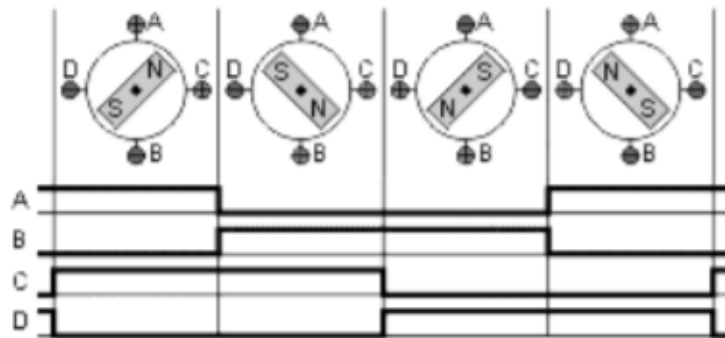


Рис 1.12 Комутація фаз двигуна у повнокроковому режимі з перекриттям фаз

При вмиканні і вимиканні живлення двигуна слід не знеструмлювати його обмотки для того, щоб двигун забезпечував повний момент, оскільки ротор може зсунутися на половину кроку і втратити своє положення. Для запобігання цього в обмотки слід подавати з системи керування струм утримання, що і відносять до основного недоліку такого режиму [14].

В табл. 1.5 наведено порядок збудження фаз при повнокроковому режимі з перекриттям фаз .

Таблиця 1.5

Повнокроковий однофазний режим з перекриттям фаз

| Фаза | Поч аток | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фаза 1 | * | * | | * | * | | * | * | |
| Фаза 2 | | * | * | | * | * | | * | * |

| | | | | | | | | | |
|--------|---|--|---|---|--|---|---|--|---|
| Фаза 3 | * | | * | * | | * | * | | * |
|--------|---|--|---|---|--|---|---|--|---|

1.2.3 Напівкроковий режим

Напівкроковий режим - є синтезом двох вищезазначених режимів, тобто ротор зупиняється як навпроти полюсів статора, так і в проміжному положенні між ними. З одного боку це дозволяє зменшити крок у два рази, з іншого будуть мати місце коливання моменту [4]. На рис 1.13 зображено комутацію фаз крокового двигуна в напівкроковому режимі.

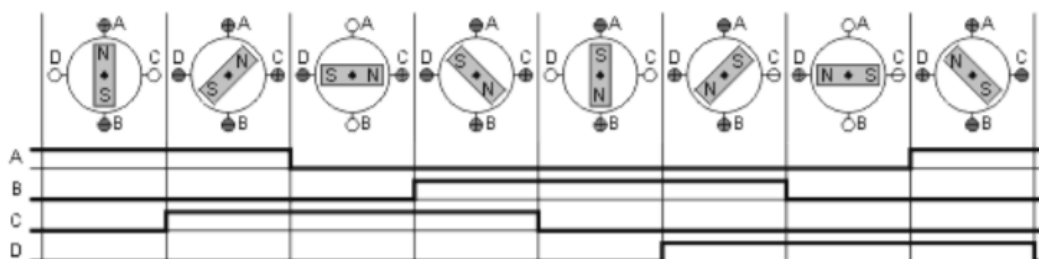


Рис 1.13 Комутація фаз двигуна в напівкроковому режимі

До табл. 1.6 занесено порядок збудження фаз при напівкроковому режимі.

Таблиця 1.6

Напівкроковий режим

| Фаза | Поч аток | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|--------|----------|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Фаза 1 | * | * | | | | * | * | * | |
| Фаза 2 | | * | * | * | | | | * | * |
| Фаза 3 | | | | * | * | * | | | |

В результаті такого керування, кутове зміщення ротора складає половину кута кроку для перших двох способів керування.

В момент часу, коли струм проходить через одну обмотку двигуна, залежність моменту від кута оберту ротора буде мати форму синусоїди взятої по модулю, що і показано на рис. 1.14 .

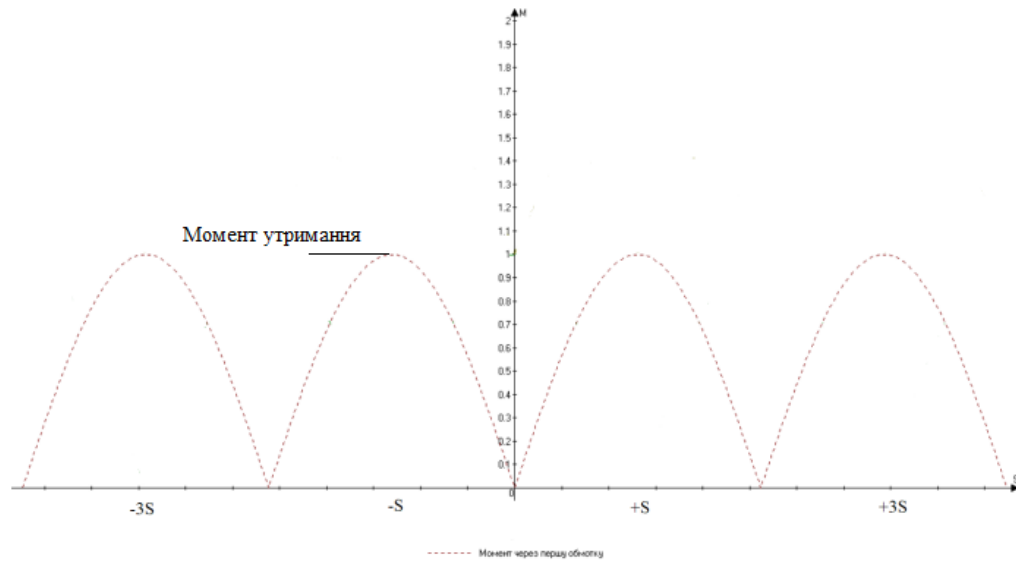


Рис 1.14 Залежність моменту від кута повороту ротора при комутації однієї фази

Кут повороту при цьому буде визначатися за наступною формулою :

$$S = \frac{2\pi}{N},$$

де N - кількість кроків двигуна на один оберт.

На практиці форма характеристики може різнитися, що пояснюється неідеальними розмірами ротора та статора [15-16]. Для побудови більш точної форми характеристики використовується наступна формула:

$$T = \frac{-T_h \sin((\pi/2)\Phi)}{S}. \quad (1.6)$$

де T_h - момент утримання, тобто максимальне значення моменту, T - момент, S - кут кроку, Φ - кут повороту.

Оскільки зсув фаз між обмотками ротора складатиме 90 градусів, то через другу обмотка форма моменту буде зсунута на величину $\frac{\pi}{2}$, що і зображено на рис 1.15

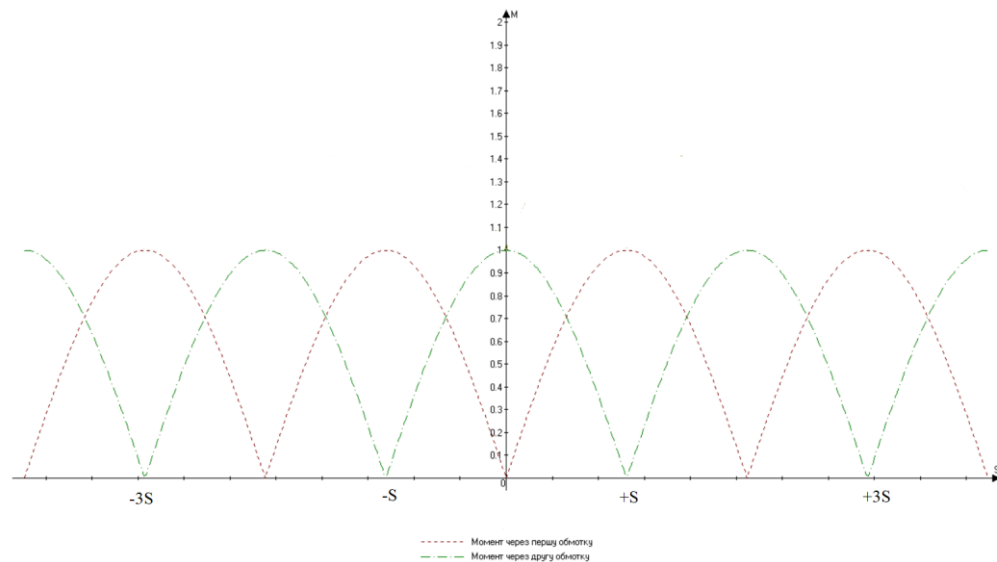


Рис 1.15 Залежність моменту від кута повороту ротора при комутації двох фаз двигуна

При проходженні струму через дві обмотки , загальний момент буде становити суму із окремих обмоток двигуна, що і показано на рис 1.16.

При умові того, що струми в обмотках будуть однаковими , то максимальне значення моменту утримання зміститься на половину кроку , точка рівноваги також зміститься та значення моменту буде більшим в $\sqrt{2}$ у порівнянні з комутацією струму через одну обмотку.

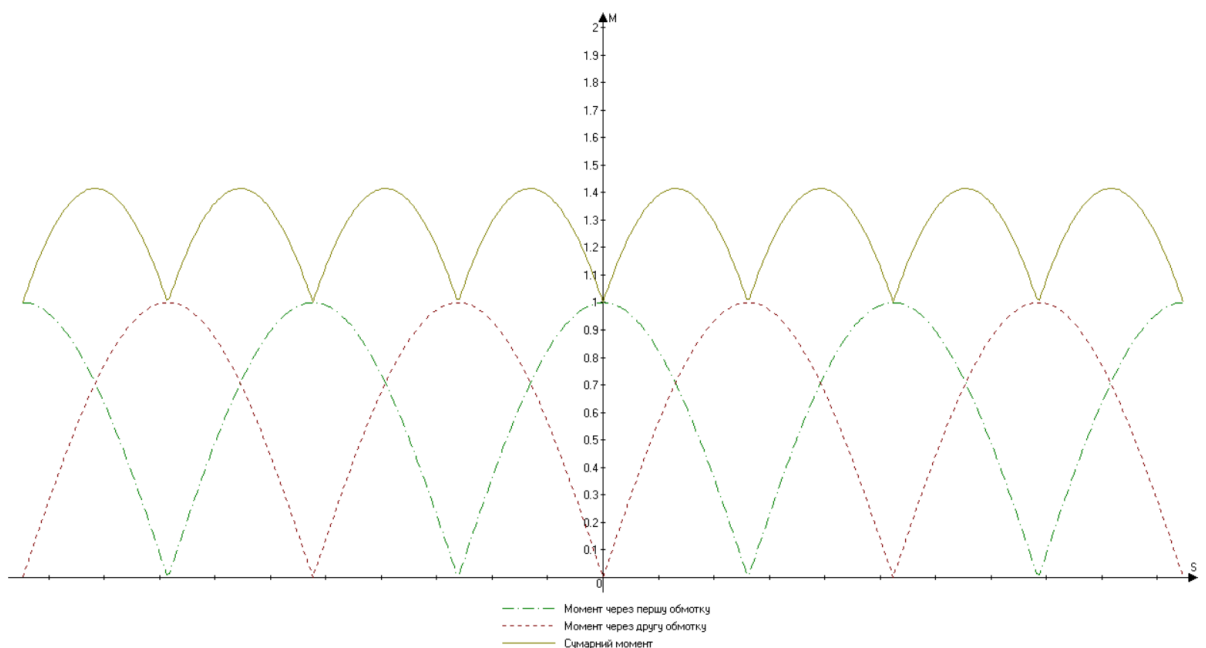


Рис 1.16 Залежність сумарного моменту від кута повороту ротора

Сумарний момент двигуна не є постійним і має певну величину пульсацій, що буде негативно впливати на його роботу. Для того щоб запобігти цьому явищу, слід змінити форму та закон керування струмом для комутації обмоток двигуна.

На рис 1.17 можна побачити різницю між величиною та можливими напрямками магнітного поля при проходженні струму через одну та через дві обмотки відповідно [16].

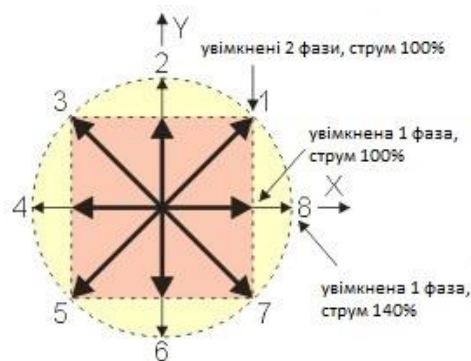


Рис 1.17 Величина моменту та його напрямок при різних режимах живлення фаз

При протіканні струму через одну обмотку, ротор може зайняти положення 1, 3, 5, 7. Коли струм протікає через дві обмотки, то ротор займає положення 2, 8, 6, 4. Якщо ці два режими роботи сумістити між собою, то ротор зможе займати всі положення від 1 до 8.

При напівкроковому режимі при резонансі відбувається часткова втрата моменту, на відміну від повнокрокового режиму, в якому

Недоліком покровокового режиму є досить значне коливання моменту від кроку до кроку. У тих положеннях ротора, коли живиться одна фаза, момент складає приблизно 70% від повного, коли живляться дві фази. Ці коливання можуть бути причиною підвищених вібрацій і шуму, хоча вони все одно залишаються меншими, ніж в повнокроковому режимі [16].

1.2.4 Мікрокроковий режим

Мікрокроковий режим - це режим керування кроковим двигуном , при якому при подачі одного керуючого імпульсу кроковий двигун здійснює оборот ротора не менше ніж на половину кроку. При цьому менший кут кроку забезпечує більш точне керування ротором.

Для того щоб отримати необхідний напрям магнітного поля, слід обрати не тільки правильне положення струмів в катушках, але і правильне відношення цих струмів. На рис 1.18 зображена залежність моменту від кута повороту ротора у випадку різних значень фаз струму [16].

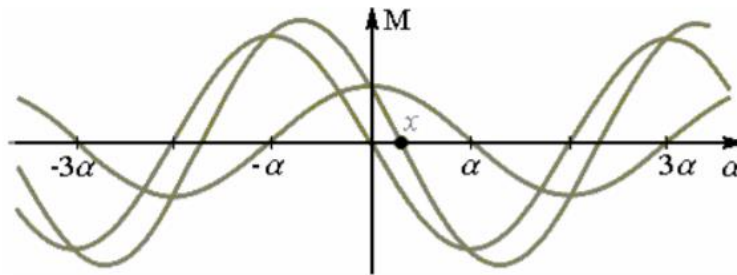


Рис 1.18 залежність моменту від кута повороту ротора у випадку різних значень фаз струму

Якщо одночасно подати живлення на дві сусідні обмотки двигуна і при цьому струми в цих обмотках не будуть рівні , то результуючий момент буде визначатися як $M_h = \sqrt{M_a^2 + M_b^2}$, а точка рівноваги ротора при цьому зміститься в точку, яка буде визначатися:

$$x = \frac{2\pi}{\alpha} \arctg\left(\frac{M_b}{M_a}\right), \quad (1.7)$$

де M_a та M_b - моменти, що створені першою та другою фазою ; x - положення рівноваги ротора.

З цього можна зробити висновок, що ротор крокового двигуна може знаходитися в будь-якій точці у положенні статичної рівноваги. Це

реалізується шляхом правильного підбору відношення струмів в обмотках двигуна.

На практиці при здійсненні кожного кроку двигуна, ротор не одразу зупиняється в новому положенні рівноваги, а здійснює затухаючі коливання вокруг положення рівноваги. Ці коливання не завжди є бажаними, тому як раз з метою позбавлення від них і використовується мікрокроковий режим. На рис 1.19 показані зміщення ротора при роботі в повнокроковому і мікрокроковому режимах.

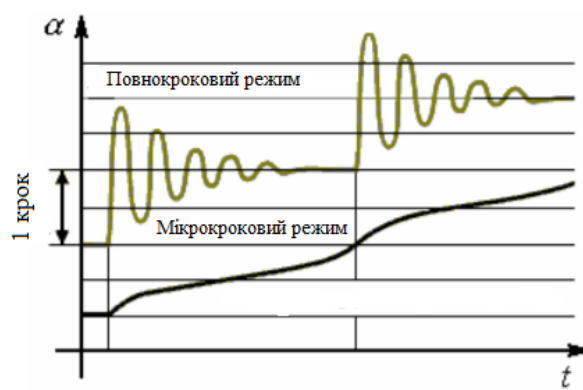


Рис 1.19 Порівняння переміщення ротора в повнокроковому та мікрокроковому режимах

Характер прямої для мікрокрокового режиму є більше лінійним та плавним, без викидів, які присутні в повнокроковому режимі. Якщо через обмотки крокового двигуна протікає струм синусоїдальної форми, то в нього будуть спостерігатися певні коливання швидкості [17].

Це явище пояснюється нестабільністю повітряного проміжку між полюсами ротора і статора, наявністю явища гістерезису, яке веде за собою зміну напрямку магнітного поля та похибку його величини. Тому на практиці положення рівноваги та момент мають відхилення завдяки формі зубців ротора та статора та матеріалу, з яких вони зроблені.

При повнокроковому режимі роботи для більшої точності та максимального моменту утримання застосовуються певні конструктивні

рішення , які пов'язані з формою зубців ротора та статора. При такій формі зубців магнітний потік буде сильно зростати. Такий підхід не підійде для мікрокрокового режиму, оскільки точність його роботи стане меншою.

Для покращення точності в мікрокроковому режимі слід використовувати двигуни , у яких момент утримання в знеструмленому стані менше. Полюси ротора і статора в них мають скошену форму зубців [17].

Ще одне джерело похибок позиціонування - це помилка квантування ЦАП, за допомогою якого формуються струми фаз. Справа в тому, що струм повинен формуватися за синусоїдальним законом, тому для мінімізації похибки лінійний ЦАП повинен мати підвищену розрядність. Навіть якщо ЦАП точно сформував синусоїдальну опорну напругу, його потрібно підсилити і перетворити в синусоїдальний струм обмоток.

Багато драйверів мають значну нелінійність поблизу нульового значення струму, що викликає значні спотворення форми і, як наслідок, значні помилки позиціонування [18].

Мікрокроковий режим має такі переваги серед інших режимів роботи:

- значне зменшення кількості вібрацій ;
- значне зменшення шуму;
- вирівнювання моменту;
- уникнення явища резонансу;
- найбільша точність кроку серед усіх інших режимів;

До мінусів такого режиму можна віднести:

- зниження максимальної частоти обертання ротора;
- зниження максимального моменту крокового двигуна;

В роботі буде використовуватися мікрокроковий режим керування, оскільки він має більш високу точність позиціонування ротора , що дає змогу двигуну працювати плавно , без перебоїв.

1.3 Вплив навантаження та тертя на момент двигуна

1.3.1 Вплив навантаження на момент двигуна

Момент, що розвиває кроковий двигун залежить від величини струму в його обмотках, швидкості та системи керування. При розробці та розрахунку систем керування слід врахувати, що обмотки двигуна являють собою індуктивність, яка буде визначати час спадання та зростання струму. На рис 1.20 зображено графік форми струму при різних швидкостях роботи двигуна.

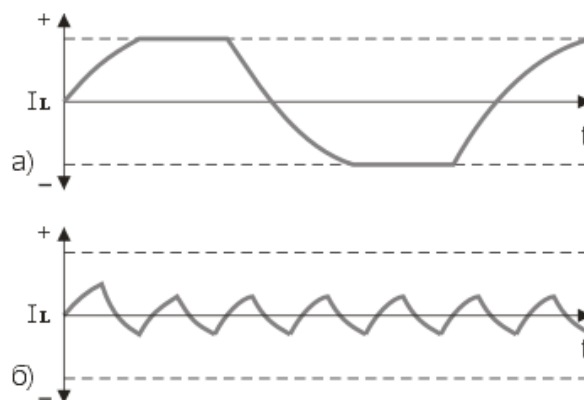


Рис 1.20 Форма струму при різних швидкостях

З рис 1.20 а) видно, що час зростання та спаду струму не впливає на момент, проте при високих швидкостях струм не встигає досягти свого номінального значення, що показано на рис 1.20 б).

Для мінімізації втрати моменту двигуна, системи керування робляться таким чином, щоб збільшити частоту комутації фаз. Це призведе до того, що починаючи з деякої частоти зрізу момент почне

спадати Параметри двигуна при різних видах навантаження будуть мати різні значення. Залежність моменту від швидкості наведена на рис 1.21 .



Рис. 1.21 Залежність моменту від швидкості

Ця залежність складається з двох кривих - області розгону та старту. Область розгону показує, який має бути момент, щоб кроковий двигун підтримував оберти без пропуску кроків. При перетині цієї кривої осі v - можна знайти максимальну швидкість для даного двигуна в режимі холостого ходу.

Область старту показує, при якому максимальному моменті тертя для даної швидкості кроковий двигун здатний рушити. При перетині цієї кривої осі v - знаходиться максимальна швидкість старту в режимі холостого ходу, тобто без навантаження [18].

Для синхронної роботи двигуна стартувати слід з низької швидкості в області старту, і плавно підвищувати швидкість в області розгону. При зупинці потрібно діяти в зворотному порядку: спочатку виконати гальмування, і тільки увійшовши в область старту можна припинити подачу керуючих імпульсів. На практиці використовуються швидкості до 10000 повних кроків за секунду, що і досягається шляхом синхронної роботи двигуна.

Для здійснення розгону слід правильно обрати закон за яким буде змінюватися швидкість і прискорення набуватиме максимального значення. Цей закон обирається експериментальним шляхом за критерієм мінімального часу для конкретного навантаження. Його реалізація проводиться за допомогою мікроконтролеру, для якого пишеться програма.

Мікроконтролер слугує також джерелом тактової частоти для драйверу крокового двигуна. Для генерації частоти слід використовувати апаратний таймер таким чином, щоб він зчитував тривалість кроку. Якщо ж двигун розганяється або гальмується, цей період змінюється з кожним новим кроком [18].

При розгоні або гальмуванні з постійним прискоренням частота повторення кроків повинна змінюватися лінійно, відповідно значення періоду, яке необхідно завантажувати в таймер, має змінюватися за гіперболічним законом [18-19].

1.3.2 Вплив тертя на момент двигуна

За рахунок сили тертя в кроковому двигуні виникають мертві зони, при яких момент двигуна буде рівний нулю. На рис. 1.22 показана залежність моменту від кута повороту ротора.

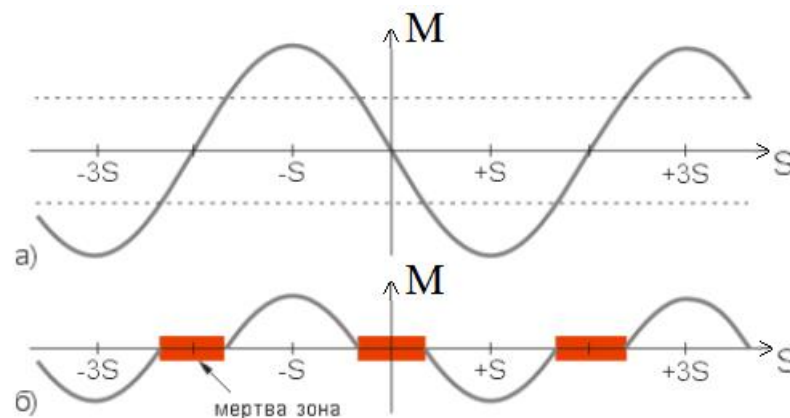


Рис. 1.22 Виникнення мертвих зон в результаті дії тертя

На рис 1.22 а) зображена залежність моменту від кута повороту, яка відповідає ідеальному кроковому двигуну і має синусоїдальну форму. Точки S є положеннями рівноваги ротора для ненавантаженого двигуна і відповідають кільком послідовним крокам.

Якщо до валу двигуна докласти зовнішній момент, менший моменту утримання, то кутове положення ротора зміниться на деякий кут Φ , який буде визначатися за формулою 1.8 :

$$\Phi = \frac{\pi N}{2} * \sin \frac{M_a}{M_h}, \quad (1.8)$$

де M_a - прикладений момент, M_h - момент утримання, N - кількість кроків двигуна за один оберт.

Кутове зміщення Φ є помилкою позиціонування навантаженого двигуна. Якщо до валу двигуна докласти момент, що перевищує момент утримання, то під дією цього моменту вал повернеться. У такому режимі положення ротора є неконтрольованим.

На практиці крокові двигуни стикаються із проблемою подолання сили тертя при прикладенні до нього моменту. Ця сила може бути як статичною так і динамічною [19].

На рис 1.18 пунктирними лініями зображений діапазон моменту тертя, тобто для обертання ротора використовується лише той момент, що не потрапляє в цей діапазон. Внаслідок цього тертя зменшує момент валу двигуна і навколо кожного положення рівноваги ротора з'являються мертві зони, ширина яких визначається за формулою 1.9 :

$$d = \frac{4S}{\pi} * \arcsin\left(\frac{M_f}{M_h}\right), \quad (1.9)$$

де S - кут кроку в радіанах, M_f - момент тертя, M_h - момент утримання.

Мертві зони обмежують точність позиціонування. Наприклад, наявність статичного тертя в половину від пікового моменту двигуна з кроком 90 град. викличе наявність мертвих зон в 60 град. Це означає, що

крок двигуна може коливатися від 30 до 150 град., В залежності від того, в якій точці мертвої зони зупиниться ротор після чергового кроку [19].

Проте наявність таких мертвих зон є досить важливою для мікрокрокового режиму , оскільки при ширині зони d , то мікрокрок величиною d не зрушить ротор з місця. Тому для систем з використанням мікрокроків дуже важливо мінімізувати тертя спокою.

Коли до двигуна під'єднати навантаження , виникають зрушення між положенням ротора та напрямком магнітного поля. Потрібно відзначити, що запізнювання або випередження відноситься тільки до положення, але не до швидкості. У будь-якому випадку, якщо синхронність роботи двигуна не втрачена, це запізнювання або випередження не може перевищувати величини двох повних кроків.

Кожен раз, коли кроковий двигун здійснює крок, ротор повертається на S радіан. При цьому мінімальний момент має в місце, коли ротор знаходиться рівно між сусідніми положеннями рівноваги, що і зображено на рис 1.23 .

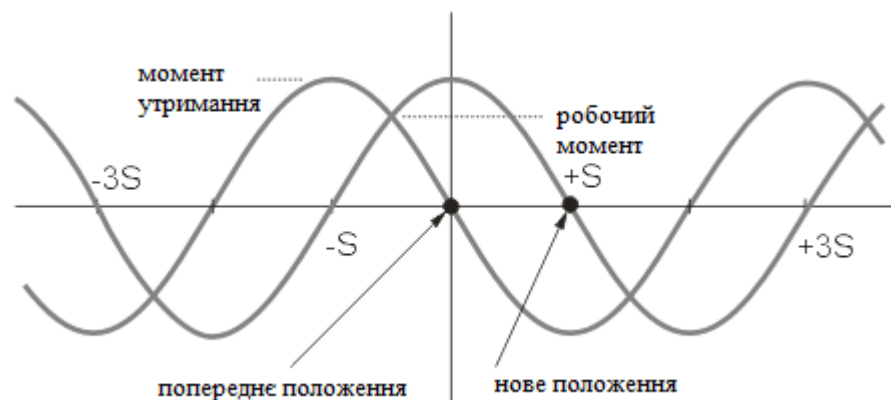


Рис. 1.23 Момент утримання і робочий момент крокової двигуна

Такий момент називають робочим моментом і він характеризує який найбільший момент долає двигун при обертанні з малою швидкістю.

Розглянувши всі методи керування кроковим двигуном можна зробити висновок про те , що кожен із цих методів підходить під певні умови задачі. Проте у кожному з цих методів форма струму і відповідно

момент двигуна мають певну величину пульсацій, яку слід прибрати для того, щоб величина моменту мала постійне значення.

Сумарний моменту при комутації двох обмоток має пульсації, які негативно впливатимуть на роботу двигуна. Вони виникають за рахунок зубчатої структури двигуна та імпульсного моменту струму керування. Пульсація негативно впливатиме на його застосування в приладах, в яких необхідне точне позиціонування та досить велика точність кроку, наприклад у принтерах. При ривковій, непостійній швидкості їх роботи буде виникати неправильна робота таких приладів. Надійність та ресурс крокового двигуна при цьому буде значно зменшена, оскільки підшипники будуть швидко зношуватися [20].

1.4 Резонанс крокового двигуна

Для крокових двигунів досить поширеним явищем, яке досить суттєво впливає на їхню роботу - є явище резонансу.

Цей ефект проявляється у вигляді спаду величини моменту на деяких швидкостях. Внаслідок цього зменшується точність позиціонування двигуна, оскільки зубці статора починають проскакувати зубці ротора і синхронна робота цих двох деталей неможлива. Явище резонансу виникає за умови, коли частота кроку співпадає з власною резонансною частотою ротора двигуна [18].

При кроці двигуна, ротор не може миттєво зайняти нову позицію, а здійснює певні коливання до того моменту, поки не увійде в стан рівноваги. Це явище пояснюється тим, що статор, ротор та магнітне поле, яке виникає внаслідок протікання струму через обмотки двигуна - являє собою маятник, частота роботи якого залежить від моменту інерції ротора, навантаження та величини магнітного поля. Ця частота визначається за формулою 1.10.

$$f_p = \frac{\sqrt{\frac{NM_h}{J_R + J_L}}}{4\pi}, \quad (1.10)$$

де f_p - резонансна частота , N - кількість повних кроків за оберт, M_h - момент утримання для способу керування і струму фаз , J_R та J_L - моменти інерції ротора та навантаження відповідно.

Як видно із формули 1.9 - величина частоти залежить від куту повороту двигуна та від відношення моменту утримання до сумарного моменту інерції ротора та навантаження.

Резонансу частоту визначає момент інерції ротора крокового двигуна і момент інерції навантаження , що підключене до валу двигуна. На практиці, для режиму холостого ходу двигуна , частота роботи ротора задається як параметр, проте слід зауважити, що будь-яке підключення навантаження може змінити значення цієї частоти [17].

В реальних умовах при ввімкненому в схему навантаженні явище резонансу призводить до труднощів при роботі на частоті, що по своїй величині близька до резонансної. Сумарний момент буде дорівнювати нулю , тому для вирішення цього явище потрібно створити такі умови, внаслідок яких двигун при розгоні буде долати величину цієї резонансної частоти. В деяких випадках, проблеми з втратою точності позиціонування можуть виникати і на гармоніках частоти основного резонансу.

При подачі на обмотки двигуна сигналів , які не мають синусоїдальної або косинусоїдальної форми струму, головною причиною виникнення резонансу є нестабільне обертання ротору двигуна. Коли ротор робить один крок, то до нього передається певна енергія, що провокує поштовх [19]. Через цей поштовх і формуються коливання. Для полукрокового режиму роботи двигуна , величина енергії становить 30% від енергії повного кроку, що призводить до зменшення амплітуди коливань. Проте, при реалізації мікрокрокового режиму ця величина

становить близько 0.1% , якщо крок обертання буде становити 1/32 від основного кроку.

Для боротьби із цим явищем можна використати електронні методи та механічні. Ротор який коливається, створює в обмотках крокового двигуна ЕРС. Якщо після її появи обмотки будуть закорочуватися, то на даному кроці не буде відбуватися явища резонансу.

При проектуванні крокового двигуна можна використовувати різноманітні еластичні матеріали при виконанні механічних муфт зв'язку з навантаженням. Такий матеріал дасть змогу поглинати енергію в резонансній системі, внаслідок чого коливання будуть затухати.

Ще одним способом є побудова алгоритмів роботи драйверу керування. Якщо комутувати дві фази крокового двигуна , то частота його роботи буде на 20% більшою у порівнянні з однією фазою. Тому при розрахованому значенні резонансної частоти можна змінювати режими роботи двигуна з комутації однієї фази на комутацію двох фаз, внаслідок чого величина цієї частоти буде пройдена [19].

Також слід враховувати той факт, що при старті та зупинці двигуна можна використовувати частоти , які за величиною будуть вищими ніж резонансна. Така реалізація можлива за допомогою мікроконтролерних систем керування та каналу зворотнього зв'язку.

Висновки по першого розділу

В даному розділі були розглянуті основні теоретичні відомості про кроковий двигун. Для керування їм в роботі буде реалізовуватися мікрокроковий режим, оскільки він має найбільшу точність серед усіх запропонованих методів та є найточнішим. Крім того, при реалізації цього методу буде мінімізована поява явища резонансу, що позитивно впливатиме сумарний момент та мінімізує величину його пульсацій.

Двигун буде підключатися уніполярним способом, оскільки величина моменту його буде більшою ніж в інших режимах та його момент буде мати середнє значення при середньому споживанні електроенергії.

2. ОПИС МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ

Керування кроковими двигунами може відбуватися за допомогою струму синусоїдальної або прямокутної форми. Синусоїдальна форма використовуються тоді, коли форма ЕРС буде синусоїдальною, а прямокутна при трапецієдальній формі ЕРС. Момент двигуна має ідеально повторювати форму керуючого струму. Проте на практиці ЕРС не може ідеально відтворити форму керуючого струму, внаслідок чого виникають пульсації. Це пов'язано з конструкцією двигунів та фактом, що обмотки двигунів є індуктивними, що робить неможливим відтворювати необхідну форму ЕРС. Якщо взяти трапецієдальну форму струму, то для неї неможливо побудувати зміну $\frac{di}{dt}$ необхідну для переходу прямокутних імпульсів струму з результируючою крутизною обертового моменту.

Кроковий двигун також проявляє паразитний момент, що збільшує пульсації моменту. Системи керування забезпечують лише обмежене зменшення пульсацій обертового моменту. На рис 2.1 зображена еквівалентна схема однієї обмотки двигуна.

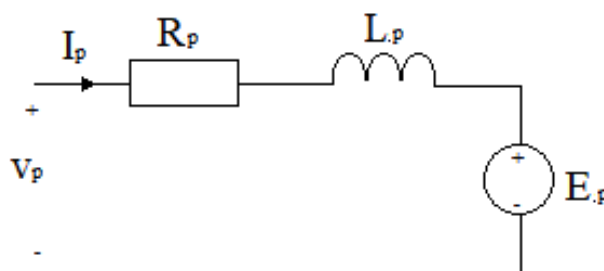


Рис 2.1 Еквівалентна схема крокового двигуна

З рис 2.1 видно, що кожна обмотка двигуна має власний опір R , індуктивність L , струм що проходить через обмотку I_p та ЕРС E_p , що буде визначатися.

$$E_p = \frac{w k_p(\varphi) V_p}{w_c}, \quad (2.1)$$

де $k_p(\varphi)$ - коефіцієнт спотворення ; w_c - максимальна частота при піковому значенні ЕРС .

Момент двигуна визначається за потужністю, що виробляє обмотка і обчислюється наступним чином

$$T \frac{w}{N_{pp}} = E_p I, \quad (2.2)$$

де N_{pp} - число полюсів двигуна ; $w/N_{pp} = w_m$ - швидкість двигуна .

Фазовий струм при цьому буде визначатися.

$$I = \frac{i_p(\varphi) V_{cc}}{R}, \quad (2.3)$$

де V_{cc}/R - максимальне значення струму, коли зміна dI_p/dt та зміна $d\varphi/dt$ буде дорівнювати нулю.

Підставляючи (2.2) та (2.3) в (2.1) отримуємо формулу для обчислення залежності моменту від куту оберту φ .

$$M(\varphi) = \frac{N_{pp} V_{cc}^2}{R w_c} [k_p(\varphi) i(\varphi)] \quad (2.4)$$

Величини та $i(\varphi)$ можна представити у вигляді спектру Фур'є , результуючий розклад яких наведено нижче.

$$k_p(\varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} K_n \exp\{jn[\varphi - (p-1)\frac{\pi}{2}]\}, p=1,2$$

$$i_p(\varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} I_n \exp\{jn[\varphi - (p-1)\frac{\pi}{2}]\}, p=1,2$$

При підстановці цих величин, отримуємо кінцеву формулу для залежності моменту від куту обертання

$$M(\varphi) = \frac{N_{pp} V_{cc}^2}{R w_c} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (1 + 2\cos(\frac{\pi}{2})) \sum_{m=-\infty}^{\infty} K_m I_{-m} \exp(jn\varphi) \quad (2.5)$$

Фазний струм, що проходить через обмотку двигуна визначається як діюче значення струму і визначатися такою залежністю :

$$i(\varphi) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} |I_n|^2$$

Мінімальне значення пульсацій струму та відповідно моменту буде визначатися за такої умови :

$$i(\varphi)^2 + \left(\frac{T(\varphi) - \sum_{m=-\infty}^{\infty} k_m I_{-m}}{\sum_{m=-\infty}^{\infty} k_m I_{-m}} \right)$$

При цьому значення $\sum_{m=-\infty}^{\infty} k_m I_{-m} = \frac{N_{pp} V_{cc}^2}{R w_c}$. Якщо дана умова буде

виконуватися, омічні втрати осердя будуть зменшені, що призведе до того, що струм, що протікає через фазу двигуна, не буде мати пульсацій та відповідно момент двигуна при цьому буде відтворювати форму фазного струму.

На рис 2.2 зображений графік, який відображає правильність умови, оскільки верхній графік моменту є постійним за величиною, на відмінну від графіка нижче, має зменшення моменту при значеннях струму від 0.1 А і більше, що говорить про те, що даний розрахунок і виконання даної умови призведе до зменшення пульсації моменту.

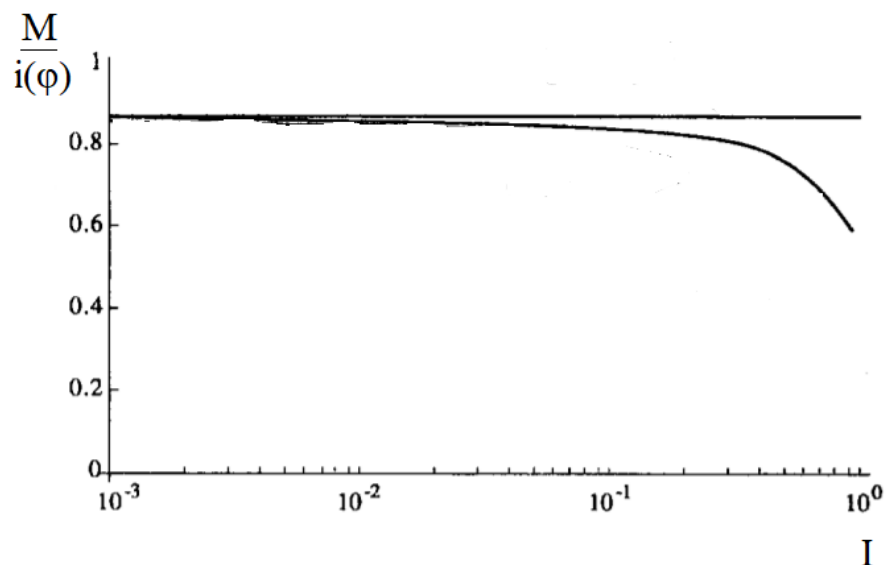


Рис 2.2 Залежність відношення моменту і фазного струму від діючого значення струму

Даний графік показує, що при дотриманні такого співвідношення момент двигуна залишається постійним, на відмінну від випадку, коли співвідношення не дотримується. Момент на деякому значенні струму починає зменшуватися, тому виконання такого співвідношення є доцільним рішенням. Проте, співвідношення працюватиме лише для повнокрокового режиму, що робить його практичне використання обмеженим, оскільки під кожен практичну задачу обирається окремий метод керування [21].

Для мікрокрокового режиму для реалізації постійного моменту крокового двигуна пропонується спосіб, при якому на першу обмотку подається струм форми $y = \sin^2(x)$ на інтервалі від 0 до π та $y = -\sin^2(x)$ на інтервалі від π до 2π , а на другу $y = \cos^2(x)$ на інтервалі від 0 до π та $y = -\cos^2(x)$ на інтервалі від π до 2π . Сумарний момент при цьому буде мати постійне по величині значення

$$\sin^2(x) + \cos^2(x) = 1. \quad (2.6)$$

На рис 2.3 зображено графіки функцій, що описують задані сигнали та їх сумарний момент.

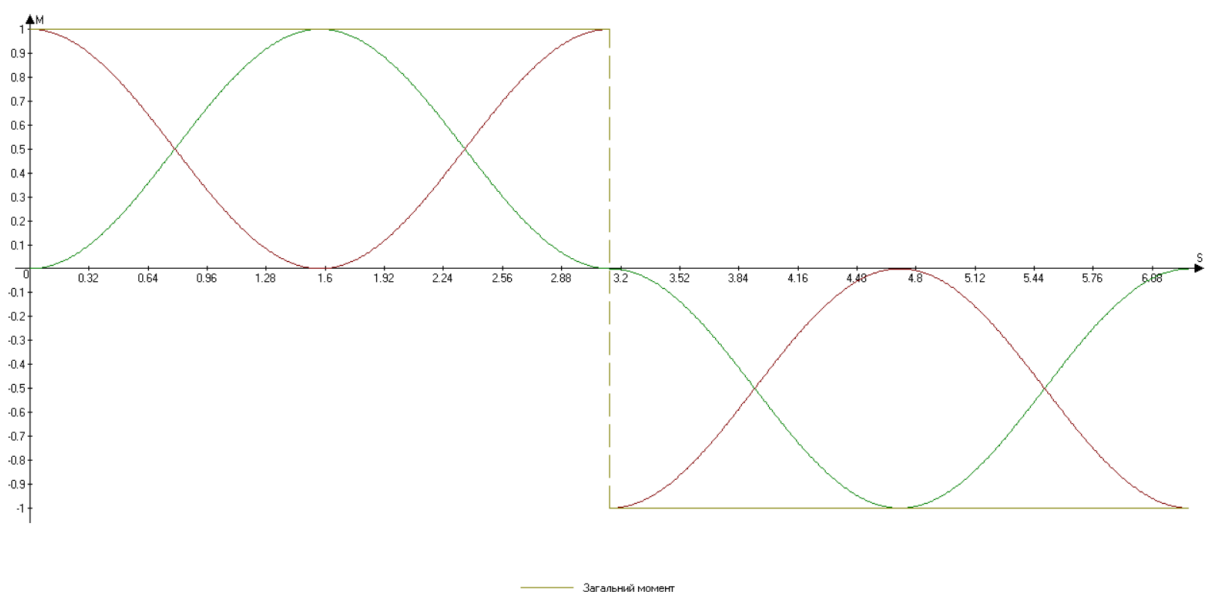


Рис 2.3 Графік сумарного моменту та його складових

Момент двигуна буде визначатися сумою струмів через обидві обмотки та його значення складатиме 1. При такому способі комутації фаз двигуна, стрибок струму буде наявний лише в одній обмотці двигуна. Фронти сигналу не будуть однаковими і сигнал буде несиметричним.

Ще одним способом формувати постійний по величині момент - є подання на першу обмотку крокового двигуна сигналів $y = \sin^2(x + \frac{\pi}{4})$ від

0 до π та $y = -\sin^2(x + \frac{\pi}{4})$ на інтервалі від π до 2π , а на другу - сигналів

$y = \cos^2(x + \frac{\pi}{4})$ від 0 до π та $y = -\cos^2(x + \frac{\pi}{4})$ на інтервалі від π до 2π .

Графік сумарного моменту при цьому зображений на рис 2.4.

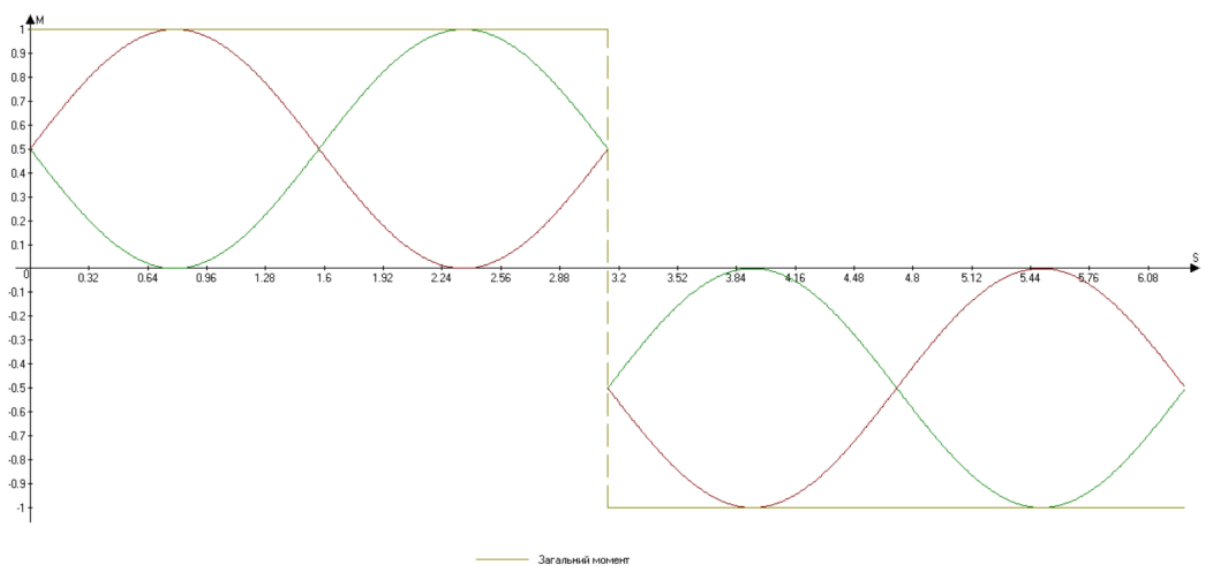


Рис 2.4 Графік сумарного моменту двигуна

Як видно з графіка, сумарний момент також має постійну величину, проте стрибок струму буде симетричним для обох обмоток, проте його полярність не може змінитися миттєво, що буде погіршувати технічні параметри двигуна. При цьому втрати в осерді будуть збільшуватися і спотворювати форму струму. Для аналізу цих двох методів необхідно дослідити спектри обох запропонованих варіантів характеристик.

2.1 Дослідження спектрів сигналів

Для побудови спектрів функцій використовуються коефіцієнти перетворення Фур'є

$$f(x) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nx + b_n \sin nx), \quad (2.7)$$

де a_0 , a_n та b_n - коефіцієнти ряду

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) dx \quad (2.8)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \cos(nx) dx \quad (2.9)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} f(x) \sin(nx) dx \quad (2.10)$$

Якщо досліджувана функція є парною, то її коефіцієнт b_n дорівнює нулю і такий ряд називається рядом Фур'є за косинусами.

Якщо досліджувана функція є непарною, то її коефіцієнти a_0 та a_n дорівнюють нулю і такий ряд називається рядом Фур'є за синусами.

В даному випадку функції $\sin^2 x$ та $\cos^2 x$ являються непарними, тому слід шукати коефіцієнт b_n . Знайдемо коефіцієнти b_n для $\sin^2 x$. З рис 2.3 видно, що функція визначена на двох інтервалах: від 0 до π як $\sin^2 x$ та від π до 2π як $-\sin^2 x$. Тому коефіцієнти буде шукатися наступним чином:

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin^2 x * \sin(nx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} (-\sin^2 x) * \sin(nx) dx \right]$$

Оскільки функція є непарною, то коефіцієнти буде визначатися як подвоєний добуток першого або другого інтегралу, тому

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin^2 x * \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (1 - \cos^2 x) * \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (\sin(nx) - \cos^2 x \sin(nx)) dx \right] = \\ &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin(nx) - \frac{(\sin(nx)(1 + \cos(2x)))}{2} dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin(nx) - \int_0^{\pi} \frac{\sin(nx)}{2} dx - \int_0^{\pi} \frac{\sin(nx) \cos(2x)}{2} dx \right] \end{aligned}$$

Для знаходження третього інтегралу слід скористатися формулою (2.11), що перетворює добутки тригонометричних функцій в суму.

$$\sin \alpha * \cos \beta = \frac{1}{2} [\sin(\alpha + \beta) + \sin(\alpha - \beta)] \quad (2.11)$$

Застосовуючи (2.11) отримуємо :

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{\sin(nx)}{2} dx - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} (\sin(2x + nx) - \sin(2x - nx)) dx \right] =$$

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{\sin(nx)}{2} dx - \frac{1}{2} \int_0^{\pi} \sin(2x + nx) dx + \int_0^{\pi} \sin(2x - nx) dx \right]$$

Знаходячи інтеграли та підставляючи верхню та нижню границю інтегрування, отримуємо кінцевий результат та зобразимо залежність $b_n(n)$, що і буде являтися спектром (див. рис.2.5)

$$b_n = \frac{4\cos(\pi n) - 4}{\pi(n^3 - 4n)}$$

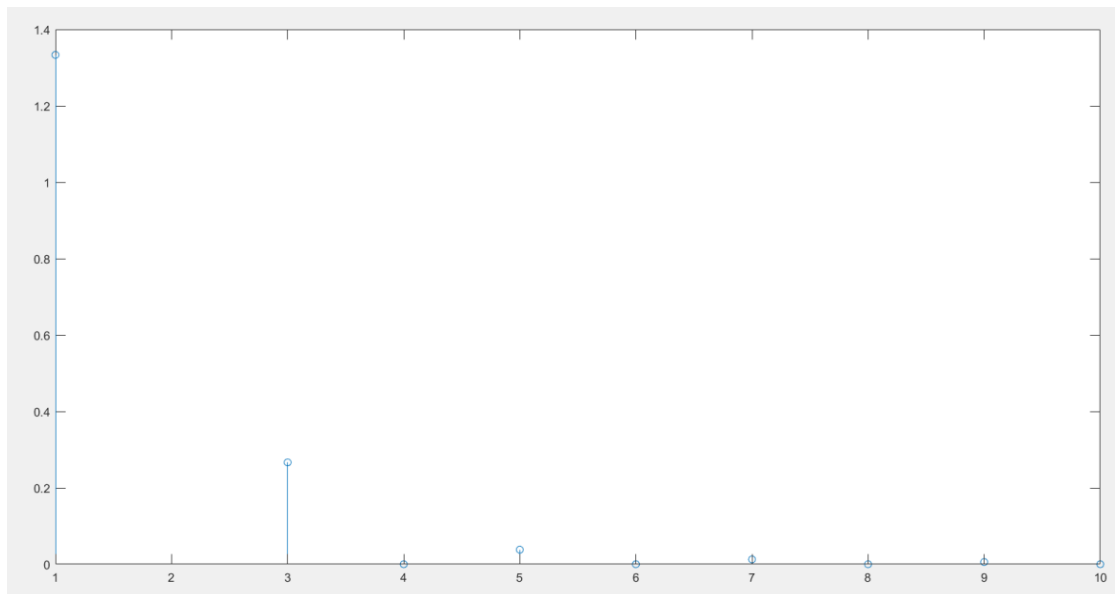


Рис 2.5 Спектр сигналу $y = \sin^2 x$

Для функції $\cos^2(x)$ коефіцієнт b_n буде шукатися наступним чином :

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \cos^2 x * \sin(nx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} (-\cos^2 x) * \sin(nx) dx \right]$$

Оскільки функція є непарною, то коефіцієнт буде визначатися як подвоєний добуток першого або другого інтегралу, тому

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \cos^2 x \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (1 - \sin^2 x) \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (\sin(nx) - \sin^2 x \sin(nx)) dx \right] =$$

$$\frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (\sin(nx) - \frac{(1 - \cos(2x)) \sin(nx)}{2} dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (\sin(nx) - \frac{1}{2} (\sin(nx) + \cos(2x) \sin(nx)) dx \right] =$$

$$\frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \left(\frac{\sin(nx)}{2} + \frac{\cos(2x) \sin(nx)}{2} \right) dx \right] = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin(nx) dx + \int_0^{\pi} \sin x (2+n) dx + \int_0^{\pi} \sin x (2-n) dx \right]$$

.

Підставляючи верхню та нижню границю інтегрування, отримуємо кінцевий результат :

$$b_n = \frac{2(n^2 - 2) \cos(\pi n - 1)}{\pi(n^3 - 4n)} .$$

залежність $b_n(n)$, $y = \cos^2 x$, зображено на рис.2.6.

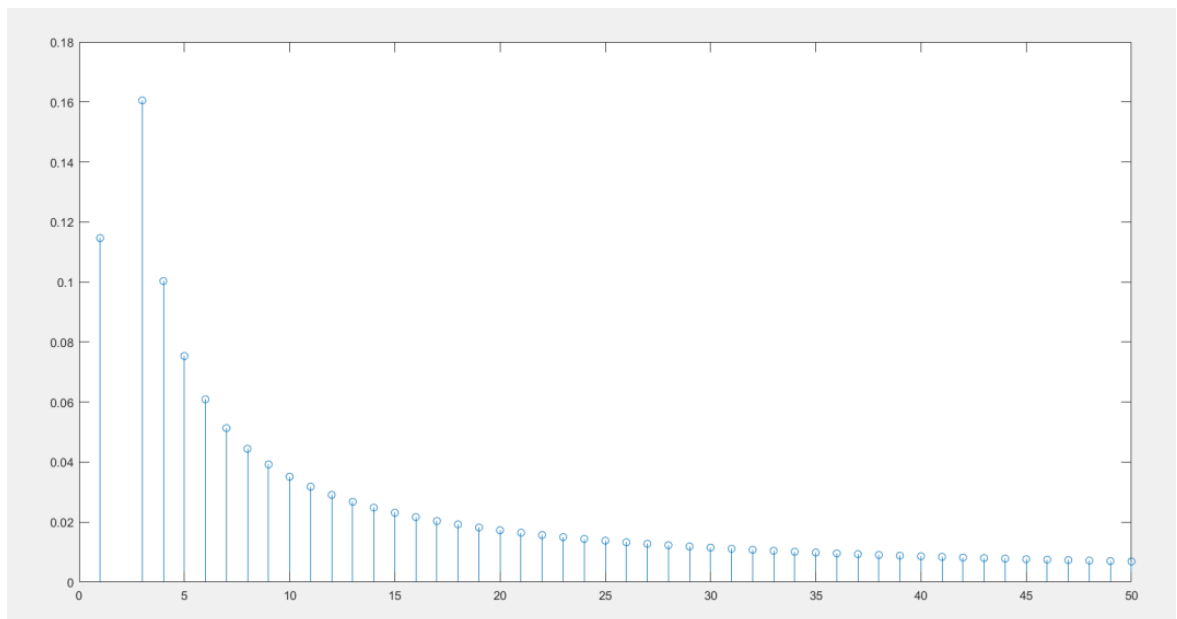


Рис 2.6 Спектр сигналу $y = \cos^2 x$

При дослідженні спектрів слід також звернутися до двох запропонованих функцій $y = \sin^2(x + \frac{\pi}{4})$ та $y = \cos^2(x + \frac{\pi}{4})$. Ці функції

також будуть непарними, тому для них слід шукати коефіцієнти b_n .

Знайдемо коефіцієнт b_n для $y = \sin^2(x + \frac{\pi}{4})$ і побудуємо спектр цієї функції.

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin^2(x + \frac{\pi}{4}) * \sin(nx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} (-\sin^2(x + \frac{\pi}{4})) * \sin(nx) dx \right]$$

Оскільки функція є непарною, то коефіцієнт буде визначатися як подвоєний добуток першого або другого інтегралу, тому

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin^2(x + \frac{\pi}{4}) * \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 - \cos(2(x + \frac{\pi}{4}))}{2} \sin(nx) dx = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1 - \cos(2x + \frac{\pi}{2})}{2} \sin(nx) dx \right] \\ &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1 + \sin 2x}{2} \sin nx dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1}{2} (1 + \sin 2x) \sin nx dx \right] = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1}{2} (\sin nx + \sin 2x \sin nx) dx \right] = \\ &= \left[\int_0^{\pi} \frac{1}{2} \sin nx dx + \int_0^{\pi} \frac{1}{2} \sin 2x \sin nx dx \right] \end{aligned}$$

Розв'яжемо ці два інтеграли окремо, і запишемо загальний результат як суму їх розв'язків.

$$\begin{aligned} \int_0^{\pi} \frac{1}{2} (\sin 2x \sin nx) dx &= \int_0^{\pi} \frac{\cos(2x - nx) - \cos(2x + nx)}{4} dx = \int_0^{\pi} \frac{\cos x(2 - n) - \cos x(2 + n)}{4} dx \\ \int_0^{\pi} \frac{\cos x(2 - n) - \cos x(2 + n)}{4} dx &= \int_0^{\pi} \frac{\cos x(2 - n)}{4} dx - \int_0^{\pi} \frac{\cos x(2 + n)}{4} dx = \left. \frac{\sin x(2 - n)}{4(2 - n)} - \frac{\sin x(2 + n)}{4(2 + n)} \right|_0^{\pi} \end{aligned}$$

При підстановці верхньої та нижньої границі, отримуємо кінцевий вираз :

$$\int_0^{\pi} \frac{1}{2} (\sin 2x \sin nx) dx = \frac{\sin \pi n}{n^2 - 4}$$

Коефіцієнт b_n для функції $y = \sin^2(x + \frac{\pi}{4})$,буде мати наступний

вигляд :

$$b_n = \frac{2 \sin^2 \frac{\pi n}{2}}{\pi n} + \frac{2 \sin \pi n}{\pi(n^2 - 4)}$$

Спектр функції $y = \sin^2(x + \pi/4)$ зображено на рис.2.7.

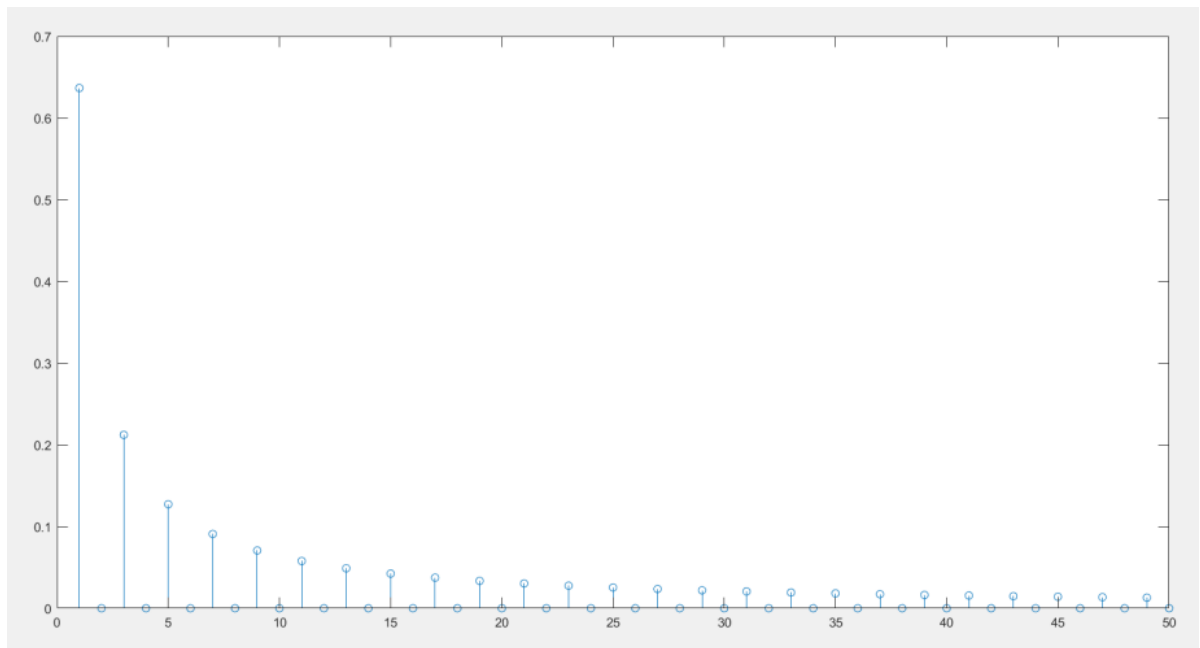


Рис 2.7 Спектр сигналу $y = \sin^2(x + \frac{\pi}{4})$

Функція $y = \cos^2(x + \frac{\pi}{4})$ є непарною, тому знаходити слід коефіцієнти b_n .

$$b_n = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \cos^2(x + \frac{\pi}{4}) * \sin(nx) dx + \int_{\pi}^{2\pi} (-\cos^2(x + \frac{\pi}{4})) * \sin(nx) dx \right]$$

Коефіцієнт буде визначатися як подвоєний добуток першого або другого інтегралу, тому : (позначити ці інтеграли окремо)

$$\begin{aligned} b_n &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \cos^2(x + \frac{\pi}{4}) * \sin(nx) dx \right] = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} \frac{1 + \cos(2(x + \frac{\pi}{4}))}{2} \sin(nx) dx = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1 + \cos(2x + \frac{\pi}{2})}{2} \sin(nx) dx \right] \\ &= \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \frac{1 - \sin 2x}{2} \sin nx dx \right] = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (1 - \sin 2x) \sin nx dx \right] = \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} (\sin nx - \sin 2x \sin nx) dx \right] = \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \sin nx dx - \int_0^{\pi} \frac{1}{2} (\sin 2x \sin nx) dx \right] = \frac{1}{\pi} \left[\frac{-\cos(nx)}{n} \Big|_0^{\pi} - \int_0^{\pi} \frac{\cos x(2-n) - \cos x(2+n)}{n} dx \right] \\ &= \frac{1}{\pi} \left[\frac{-\cos(n\pi)}{n} - \left(\frac{-\cos(0)}{n} \right) - \frac{1}{2} \left(\frac{\sin x(2-n)}{2-n} - \frac{\sin x(2+n)}{2+n} \right) \Big|_0^{\pi} \right] \end{aligned}$$

Після підстановка верхньої та нижньої границі і зводячи подібні, отримуємо кінцевий результат для коефіцієнта b_n .

$$b_n = \frac{2}{\pi} \left[\int_0^{\pi} \cos^2 \left(x + \frac{\pi}{4} \right) * \sin(nx) dx \right] = \frac{2 \sin^2 \frac{\pi n}{2}}{\pi n} + \frac{2 \sin \pi n}{\pi (4 - n^2)}.$$

Спектр функції $y = \cos^2(x + \pi/4)$ зображено на рис.2.8 .

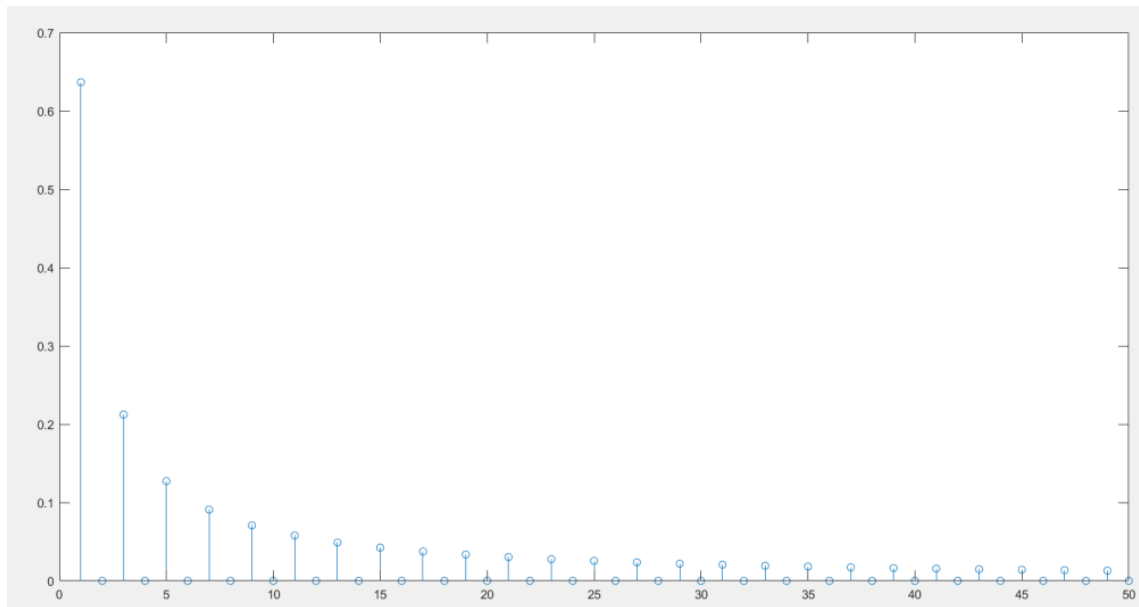


Рис 2.8 Спектр сигналу $y = \cos^2 \left(x + \frac{\pi}{4} \right)$

2.2 Способи зміни напрямку струму в кроковому двигуні

Для керування кроковим двигуном використовуються контролери, які керують мікросхемою драйвера крокового двигуна. Вона в свою чергу має виконувати наступні завдання :

- мати можливість включати і вимикати струм в обмотках, а також змінювати його напрямок;
- підтримувати задане значення струму;
- забезпечувати якомога більш швидке наростання і спад струму для хороших швидкісних характеристик.

В залежності від типу двигуна зміна полярності струму відбувається різними способами. Так для уніполярного двигуна обмотки мають вивід від середини або є додатково дві обмотки для кожної фази. Напрямок

струму буде змінюватися шляхом комутації половини двох окремих обмоток або цілих обмоток. Для реалізації такого керування використовується схема, що наведена на рис.2.9.

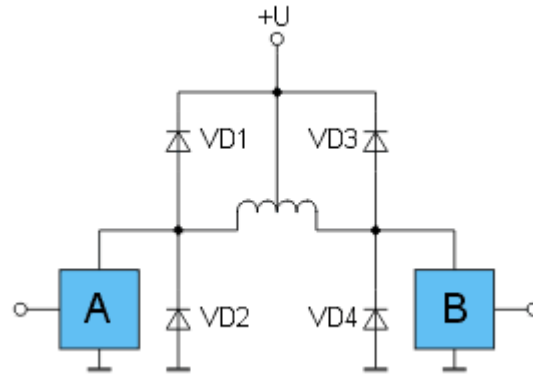


Рис. 2.9 Живлення обмотки уніполярного двигуна

Для швидкого спаду струму для уніполярного двигуна використовується схема , що наведена на рис.2.10.

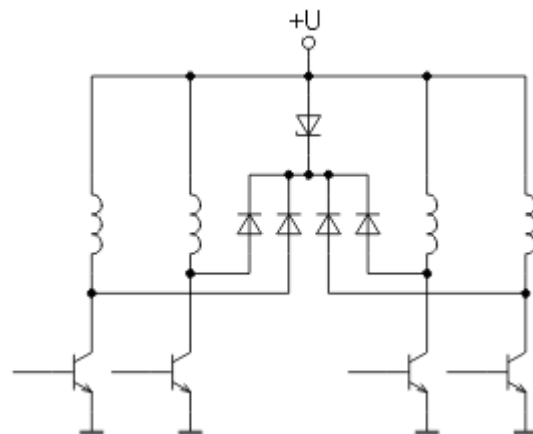


Рис.2.10 Швидкий спад струму для уніполярного двигуна

Величина пульсації струму буде залежати від швидкості спадання струму. Для повільної комутації струму слід закоротити обмотки діодом , що призведе до зменшення амплітуди пульсацій струму. При цьому двигун зможе працювати на більш низьких частотах ШІМ , що призведе до зменшення нагрівання двигуна, що є головною перевагою. Проте до недоліків відносять наступне :

- через від'ємної ЕРС, зважаючи на малу напругу на обмотці під час спаду струму, реальний середній струм обмотки може виявитися завищеними;

- при необхідності різко зменшити струм фази (наприклад, в напівкрово́вому режимі), повільний спад не дозволить зробити це швидко;

- при необхідності встановити дуже низьке значення струму фази, регулювання може порушитися через існування обмеження на мінімальний час включеного стану ключів.

Для усунення цих недоліків використовується швидкий спад струму, який реалізований за допомогою замикання обмотки на джерело живлення. Це призведе до того, що збільшаться пульсації. Проте втрати при цьому будуть значно вищими та зменшиться точність підтримання середнього значення струму [17].

Такий спосіб комутації не підійде для біполярного двигуна, оскільки в нього для комутації фаз необхідно переполюсовувати виводи обмоток. Це можливо зробити використовуючи мостову схему інвертора, яка зображена на рис.2.11.

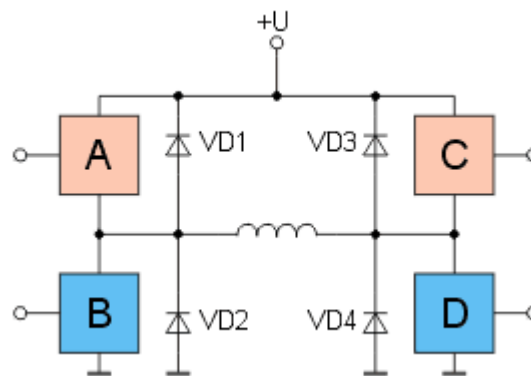


Рис.2.11 Живлення обмотки біполярного двигуна

Для знеструмлення двигуна в такій схемі існують три способи :

- вимкнути всі ключі в схемі ;
- залишити увімкненим один будь-який ключ;
- розімкнути всі ключі ;

В залежності від того, якою має бути швидкість зміни напрямку струму і обирається один із запропонованих способів. На рис.2.12 зображено напрямок протікання струму при кожному з цих способів.

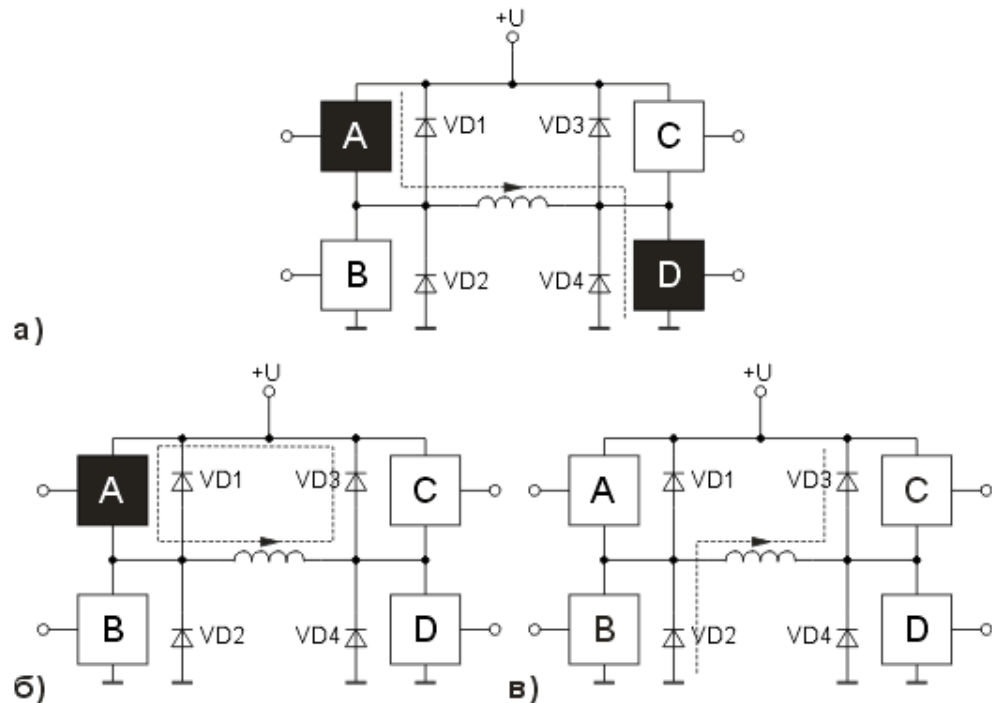


Рис.2.12 Схеми для спаду струму в біполярних крокових двигунах

У схемі б) обмотка вимкнена, проте через ключ А протікає струм, тому ЕРС буде закорочуватися через цей ключ та діод VD3. На виводах обмотки внаслідок цього буде виникати невелика напруга, що буде дорівнювати сумі напруг на діоді VD3 та ключі А. Внаслідок цієї невеликої напруги буде мала швидкість зміни полярності струму та магнітного поля. Статор двигуна буде створювати магнітне поле, що буде мати гальмівний характер для моменту двигуна, внаслідок чого він буде спадати [18].

Для схеми в), в якій замкненими є всі ключі, ЕРС самоіндукції буде замикатися через діоди VD2, VD3 на джерело живлення. При цьому на обмотці буде напруга, яка дорівнює сумі напруги джерела живлення та падіння напруг на діодах. Внаслідок цього буде більш швидкий спад струму та магнітного поля.

2.3 Стабілізація струму

Для регулювання обертового моменту двигуна необхідно змінювати величину сили струму в обмотках. Окрім цього, струм впливає на розсіяну потужність на омичних опорах обмоток, тому його величина має бути обмеженою певним діапазоном значень. Для різних режимів роботи крокового двигуна існують різні обмеження величину струму - так для реалізації мікрокрокового режиму слід подавати різні значення струму на обмотки для формування закону керування, в повнокроковому режимі необхідна реалізація переходу струму через нуль [18].

На практиці, кожен двигун має величину номінальної напруги обмоток, тому для живлення його найпростішим способом виступає під'єднання крокового двигуна напряму до джерела живлення постійної напруги. Величина струму при цьому буде пропорційна до вхідної напруги джерела живлення і обернено пропорційна омичному опору обмотки двигуна. Такий спосіб живлення двигуна називають L/R-живленням. Час перехідного процесу при такому живленні буде визначатися як L/R та наростання струму буде вестися по експоненціальному закону.

Такий спосіб живлення має досить суттєвий недолік, до якого відноситься те, що при підвищенні частоти струм не досягає свого номінального значення, внаслідок цього момент спадає. Тому використання L/R живлення є доречним при роботі на маленьких швидкостях і на практиці використовується тільки для малопотужних двигунів.

Для роботи крокового двигуна на високих швидкостях слід збільшувати величину струму в обмотках, що можливо лише при збільшенні вхідної напруги. Проте при збільшенні напруги, величина струму може перевищувати своє номінальне значення, тому до схеми слід додати

обмежуючий резистор, величина якого визначається тим, у скільки разів збільшено вхідну напругу. Тобто, якщо величина вхідної напруги збільшилася в два рази, то і величину резистора слід збільшити таким чином, щоб загальний опір в схемі складав $2R$ і такий спосіб буде називатися L/nR живлення, де n - величина, що відповідає за те, у скільки разів було змінено напругу джерела живлення. Таким чином час наростання струму буде збільшено як і сумарний момент [19].

Недоліком такого методу живлення є те, що на додатковому резисторі розсіюється потужність, що буде збільшувати величину втрат двигуна. Крім того, слід підвищувати потужність джерела живлення, що робить неможливим роботу з малопотужними кроковими двигунами. (діоди паралельно L)

Схеми L/R та L/nR живлення обмоток крокового двигуна наведені на рис 2.13.

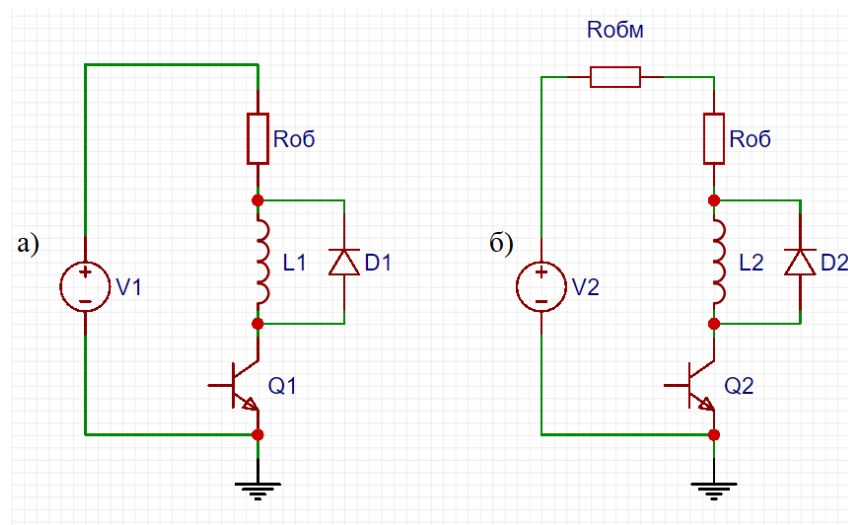


Рис.2.13 Схеми живлення обмоток крокового двигуна

Ще одним способом живлення обмоток крокового двигуна є використання двох джерел живлення. На початку кожного кроку обмотки короткочасно підключаються до більш високовольтного джерела живлення, який забезпечує більше зростання струму. Після того напруга живлення обмоток зменшується. Таким чином відбувається ступінчата напруга, діаграми формування якої зображені на рис 2.14.

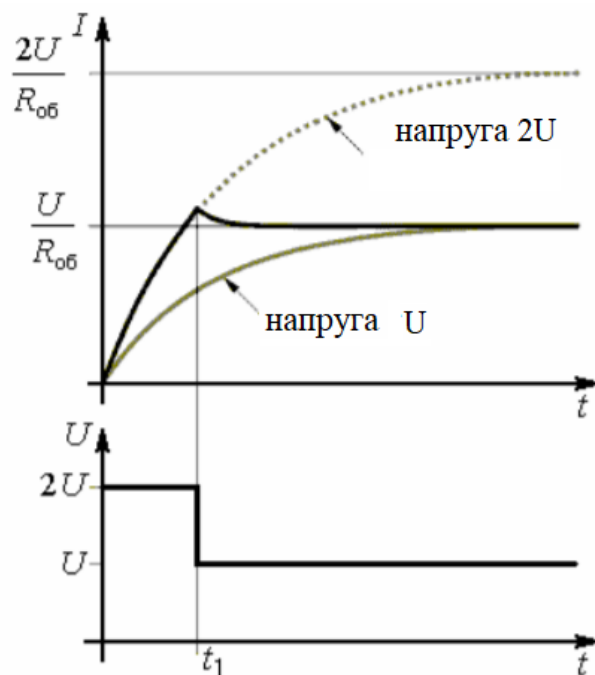


Рис.2.14 Живлення обмотки ступінчатою напругою

Для реалізації такого керування необхідні два ключових елементи, два джерела живлення та визначення моменту часу t_1 , при якому буде спад напруги у два рази. Крім того, для двигунів, які мають меншу величину індуктивності обмоток швидкість наростання струму буде більшою і заданому значенні t_1 величина середнього струму буде перевищувати номінальну та двигун перегріється.

Одним із найпростіших способів живлення обмоток є широтно-імпульсна модуляція, яка використовує ключовий елемент для подачі струму на обмотку. Такий спосіб має наступні переваги :

- швидка зміна наростання струму ;
- простота регулювання струму ;
- низькі втрати струму ;
- постійна величина моменту двигуна, незалежно від коливань напруги джерела живлення;

За рахунок регулювання тривалості імпульсів можна регулювати значення напруги та струму таким чином , щоб їх величина не

перевищували номінальний рівень. Це можливо за допомогою введення в систему керування каналу зворотнього зв'язку. Схема такого керування наведена на рис 2.15.

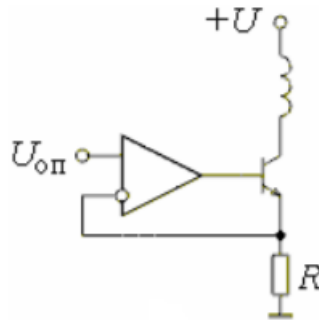


Рис.2.15 ШІМ регулювання напруги

Резистор R виступає в такій схемі датчиком струму. Напруга на ньому пропорційна струму в обмотці, тому коли струм досягає встановленого значення, ключ буде вимкнений, а коли струм буде менше цього значення - ключ буде у відкритому стані.

Величину напруги $U_{оп}$ можна задавати за допомогою ЦАП у вигляді синусоїдального та косинусоїдального сигналу, що підходить для реалізації поставленого завдання.

Ще однією схемою, в основу якої закладено ключова стабілізація струму - це схема з постійною частотою перемикання, яка наведена на рис 2.16.

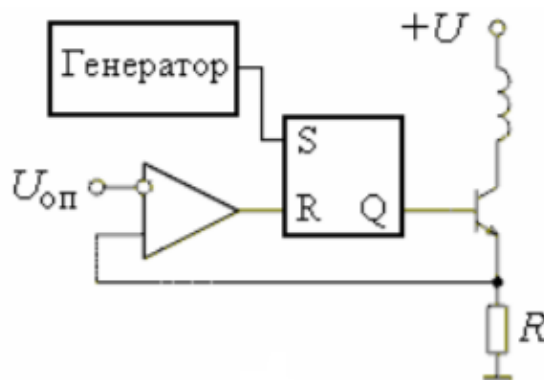


Рис.2.16 Схема ключової стабілізації струму з постійною частотою перемикання

Як видно з рис 2.16 в якості керуючого елементу транзистора виступає тригер, який встановлюється генератором, при цьому транзистор відкривається та струм обмотки починає зростати разом із падінням напруги на датчику струму R. При досягненні значення напруги з датчику до опорного, компаратор перемикається, скидаючи тригер і закриваючи транзистор. Такий метод керування називається релейним [19]. На рис 2.17 зображено порівняльний графік різних методів живлення обмоток крокового двигуна.

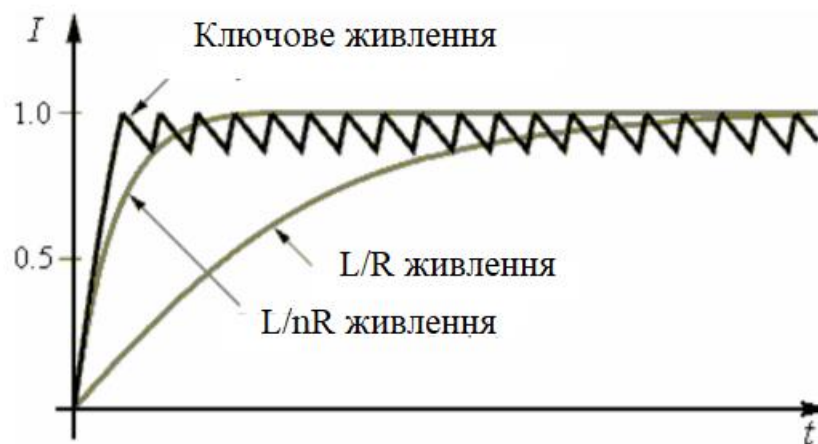


Рис.2.17 Порівняння форми струму на виході при різних типах живлення обмоток крокового двигуна

Висновки по другого розділу

В розділі було побудовано та досліджено спектри сигналів, які будуть реалізовуватися в роботі. Встановлено, що спектр функцій $y = \sin^2 x$ та $y = \cos^2 x$ не має парних гармонік. Перша, третя та п'ята гармоніки матимуть суттєвий вплив на форму струму та відповідно його пульсації, оскільки складають більше ніж 5% від першої гармоніки. Скачок струму для цих сигналів буде відбуватися лише в одній обмотці, тому фронти сумарного моменту будуть заваленими, що матиме вплив на динамічні характеристики двигуна.

Для функцій $y = \sin^2(x+\pi/4)$ та $y = \cos^2(x+\pi/4)$ було встановлено, що сигнали керування мають скачок струму в обох обмотках, тому фронти сигналу не будуть заваленими. Перша, третя та п'ята гармоніки матимуть суттєвий вплив на форму струму та відповідно його пульсації, оскільки складають більше ніж 5% від першої гармоніки.

Порівняно різні типи живлення крокового двигуна та порівняно форми струму на виході. Було встановлено, що форма струму для ключого живлення має найменший рівень пульсації моменту, тому використання такого виду живлення є доцільним для поставленої задачі.

3. ВИБІР МЕТОДУ КЕРУВАННЯ КРОКОВИМ ДВИГУНОМ

Для керування кроковим двигуном буде розглянуто два способи керування :

- ШІМ керування ;
- Релейне керування ;

3.1 ШІМ керування

3.1.1 Основні характеристики ШІМ сигналу

Широтно-імпульсна модуляція - це такий вид модуляції сигналу, при якому буде змінюватися тривалість імпульсу при постійній по величині частоті. На рис 3.1 зображений один період ШІМ, на якому відображено основні параметри сигналу.

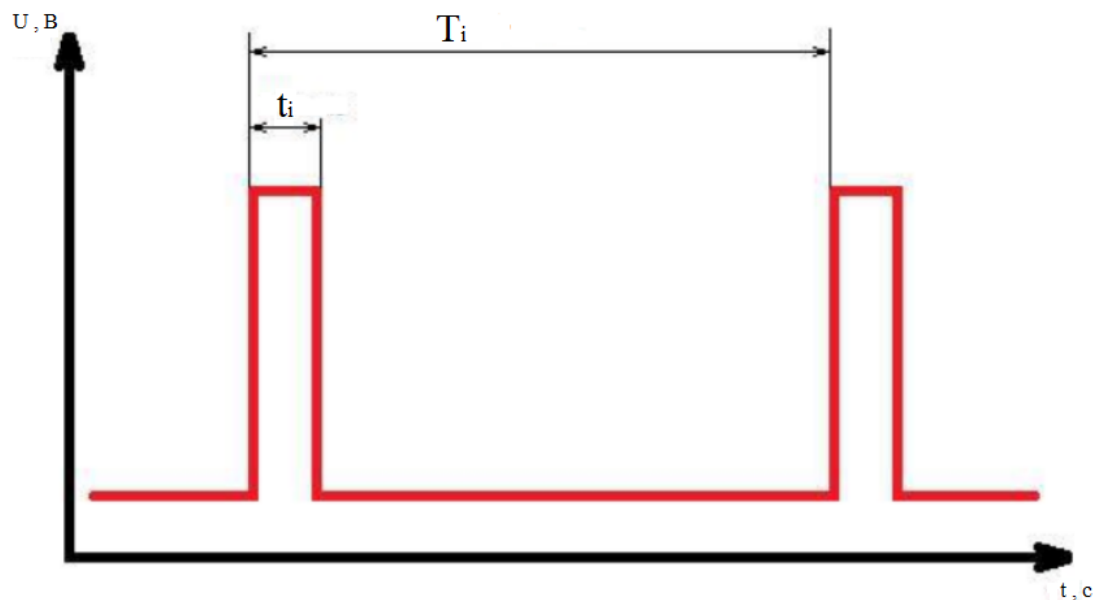


Рис 3.1 Період ШІМ-сигналу

З рисунку видно, що основними параметрами цього сигналу є період T , та тривалість імпульсу t . Виходячи із цього, при зміні тривалості

імпульсу буде змінюватися такий параметр ШІМ як скважність імпульсу, яка розраховується

$$S = \frac{T}{t} . \quad (3.1)$$

Якщо ШІМ сигнал пропустити через фільтр низьких частоті, то напруга на виході буде залежати від скважності сигналу S . На рис 3.2 зображено різні по величині скважності імпульсу та відповідно різна вихідна напруга.

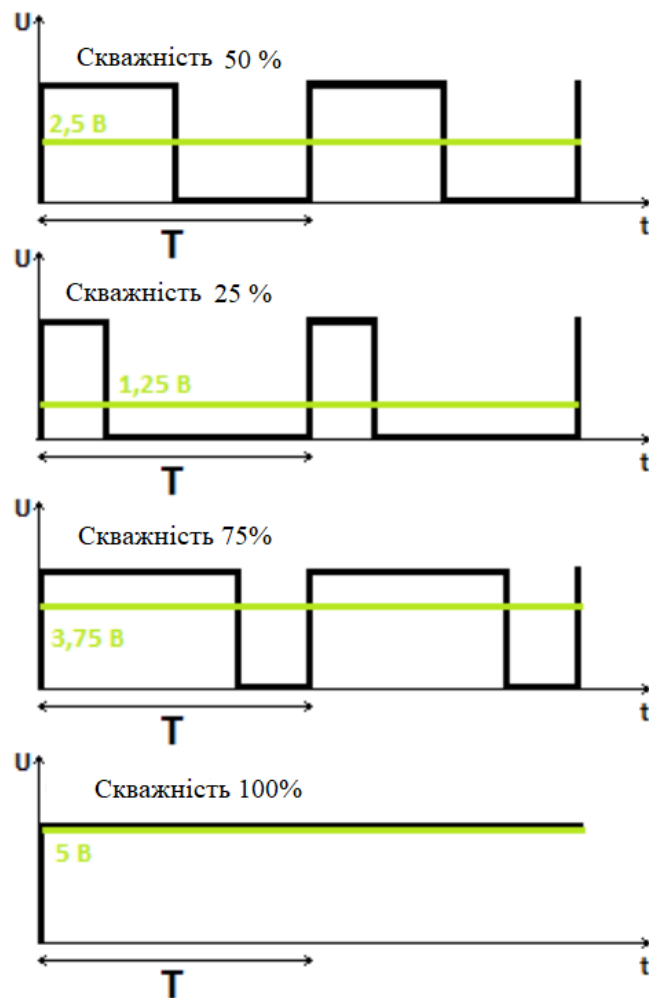


Рис 3.2 Вихідна напруга при різних значеннях скважності

На рис 3.2 видно, що значення вхідної напруги буде складати 5 В. При значенні скважності 25 % вихідна напруга буде становити 1.25 В. При скважності 100 % , тобто коли тривалість імпульсу буде дорівнювати

періоду імпульсу, напруга на виході буде мати таке саме значення як і напруга на вході.

3.1.2 Формування ШІМ для аналогових сигналів

Для формування ШІМ для аналогового сигналу використовується аналоговий компаратор, на один із входів якого подається модулюючий сигнал, а на другий вхід опорний пилообразний або трикутний сигнал, що має значно більшу частоту, ніж частота модулюючого сигналу. В момент часу, коли значення пилообразної напруги менше ніж значення модулюючого сигналу формується одиничний імпульс тривалість якого дорівнює цьому моменту часу. В момент часу, коли значення пилообразної напруги більше ніж значення модулюючого сигналу, то формується рівень логічного нуля, тривалість якого буде дорівнювати тривалості цього моменту часу. На рис. 3.3 зображено два графіки, на першому з яких синім зображено трикутний сигнал, а червоним модулюючий, а на другому ШІМ сигнал, скважність якого буде залежати від закону керування.

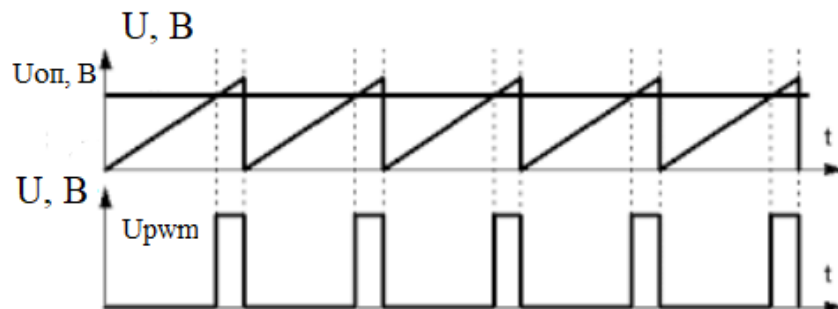


Рис 3.3 Формування ШІМ для аналогового сигналу(фон)

Для керування кроковим двигуном вище було запропоновано два випадки керування: для функцій $y = \sin^2 x$, $y = \cos^2 x$ та з їх зміщенням на кут $\pi/2$ один відносно одного. З огляду на це сформуємо ШІМ для обох випадків керування за цим алгоритмом. Для розрахунків та моделювання будемо використовувати програму Matlab 14 та один із його інструментів Simulink відповідно.

На рис 3.4 зображено схема для формування ШІМ необхідних сигналів.

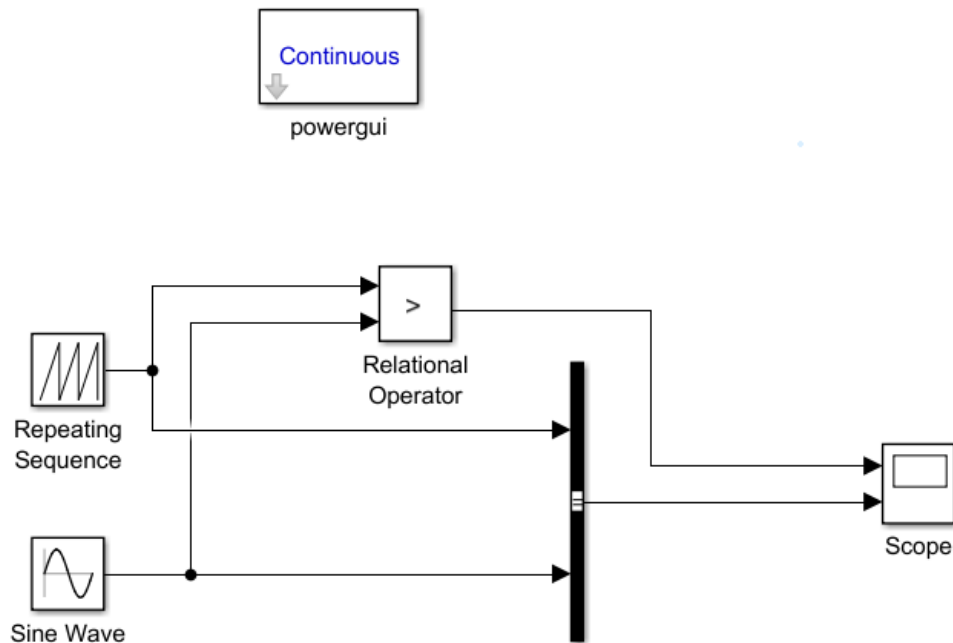


Рис 3.4 Схема для формування ШІМ

Блок порівняння синусоїдального сигналу з трикутним подає на осцилограм сигнал логічної одиниці або логічного нуля, таким чином формуючи ШІМ.

Оскільки розглянуті варіанти сигналів керування двигуна мають мати форму додатного сигналу в діапазоні від 0 до π , а від π до 2π негативну форму сигналу. Тому наступним кроком є формування двополярного ШІМ сигналу.

Для реалізації цього слід сформувати двополярний ШІМ сигнал та відфільтрувати його, внаслідок чого можна буде аналізувати який із варіантів керування краще застосовувати при ШІМ методі.

3.1.3 Формування двополярної вихідної напруги

Одним із варіантів для формування двополярного ШІМ - є використання однофазного інвертора напруги , схема якого зображена на рис 3.5 .

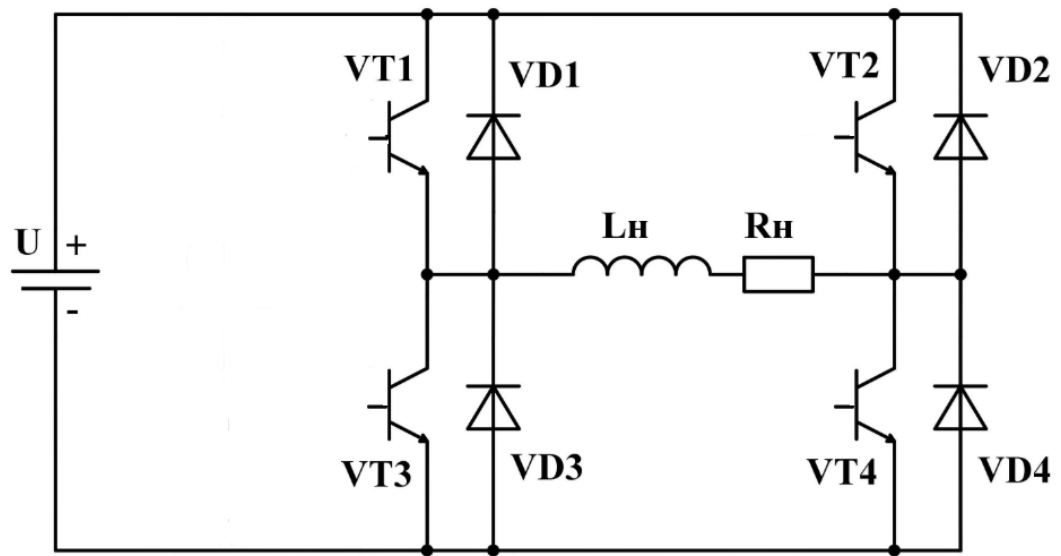


Рис 3.5 Однофазний мостовий інвертор напруги

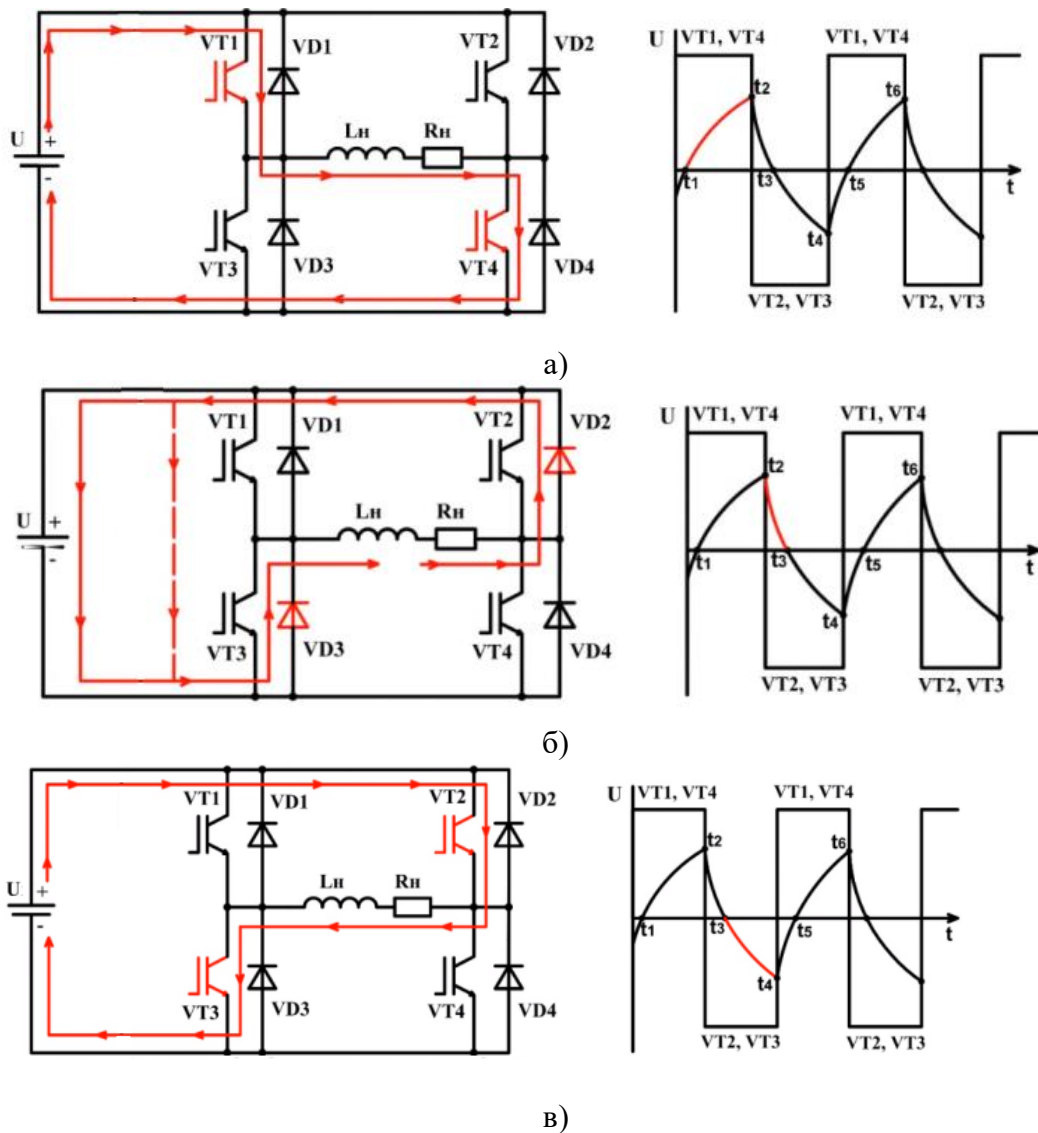
Транзистори в цій схемі мають відкриватися попарно : VT_1 разом із VT_4 , а VT_2 разом із VT_3 , на бази приходять два керуючих сигнали, які сформовані в протифазі. На рис 3.6 зображено принцип роботи однофазного мостового інвертора.

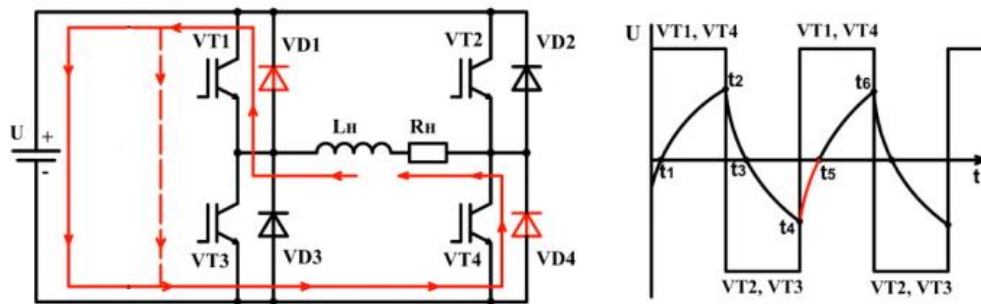
В початковий момент часу t_1 - t_2 відкриваються транзистори VT_1 - VT_4 , а струм починає зростати по експотенціальному закону з постійною часу $t = L_h/R_h$, що відображено на рис 3.6 а).

В момент часу t_2 , при якому транзистори VT_1 - VT_4 закриваються і має відбутися включення транзисторів VT_2 - VT_3 . Проте за наявності індуктивності струм не може миттєво змінити свій напрям, тому в цей момент часу струм протікає в тому самому напрямку до того часу, поки

накопичена в індуктивності енергія магнітного кола не знизиться до нуля в проміжок часу $t_2 - t_3$. Транзистори схеми при цьому закриті, тому струм буде протікати через діоди VD_3 та VD_4 , що і показано на рис 3.6 б).

При зменшенні струму до нуля, момент часу t_3 , його напрям зміниться і він буде збільшуватися, проходячи через транзистори VT_2 - VT_3 , які мають знаходитися у відкритому стані, що зображено на рис 3.6 в).





г)

Рис 3.6 Принцип роботи однофазного інвертора напруги та діаграми роботи

В момент часу t_4 транзистори VT_2 - VT_3 знаходяться в закритому стані, тому струм на відрізку часу t_4 - t_5 буде протікати через діоди VD_1 та VD_4 , поки його значення не стане нулем. Далі процес періодично повторюється.

Модель формування сигналів $y = \sin^2 x$, $y = \cos^2 x$ та їх зміщення для ШІМ методу зображена на рис 3.7.

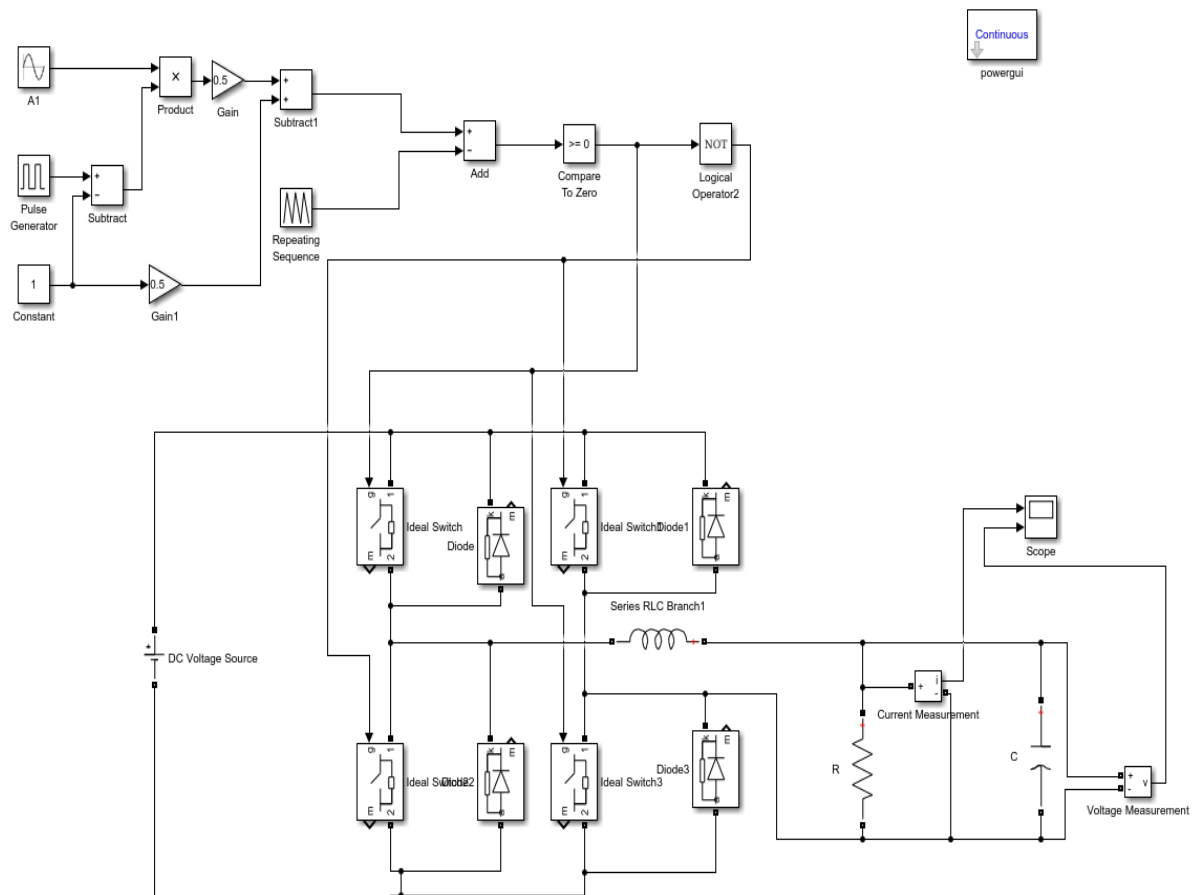


Рис 3.7 Модель формування сигналу

Для аналізу вихідного сигналу, що має подаватися на обмотку двигуна, ШІМ сигнал фільтрується за допомогою RC- фільтру, що встановлений на виході інвертора.

3.2 Релейне керування кроковим двигуном

Релейне керування це ще один спосіб формування керування кроковим двигуном. На рис 3.8 зображено модель формування сигналів $y = \sin^2 x$, $y = \cos^2 x$ та їх зміщення для релейного керування.

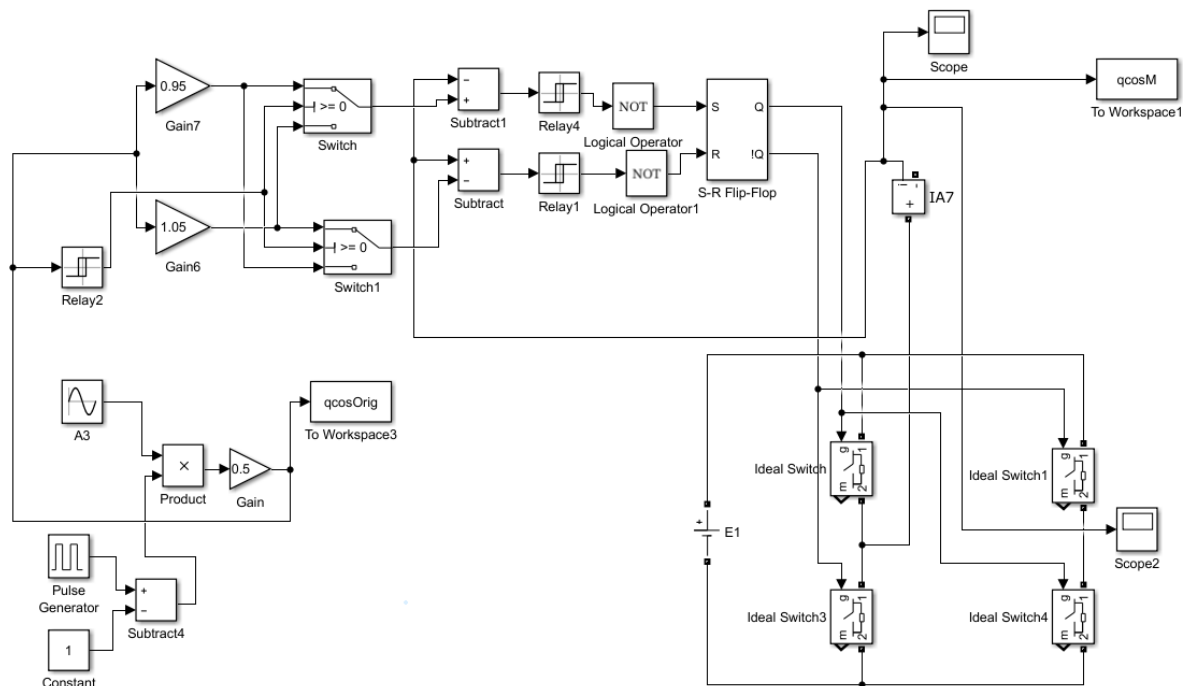


Рис 3.8 Релейне керування струму

Принцип роботи релейного керування полягає в тому, що задається певне еталоне значення фізичної величину, у випадку з кроковим двигуном - струм. Для цього значення є два пороги - верхній та нижній і

амплітуда струму змінюється в цьому діапазоні. Графік такого регулювання зображений на рис 3.9.

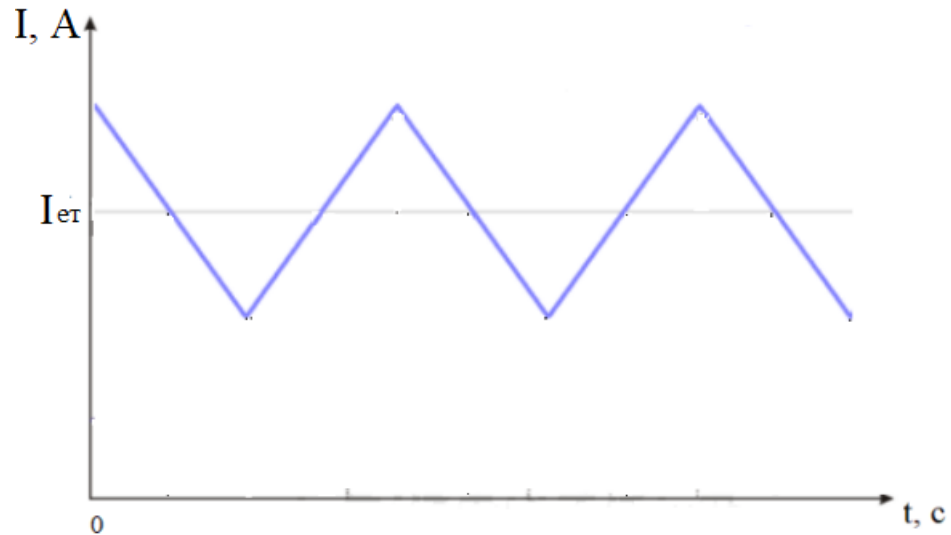


Рис 3.9 Релейне керування струму

3.3 Аналіз струму керування кроковим двигуном та сумарного моменту

Після реалізації обох методів керування величина вихідного струму та сумарного моменту обертання буде порівнюватися за такими критеріями:

- середньоквадратичне відхилення ;
- кількість імпульсів за період ;
- час зміни полярності струму.

Вихідний струм має певну значення пульсації за рахунок переключення ключових елементів схеми та перехідних процесів у реактивних елементах , так як ці явища не можуть відбуватися миттєво. Тому буде порівняний вихідний струм в амплітудній та спектральній області для реального випадку, який має певну величину пульсацій з ідеальний випадком без пульсацій. Спектри сигналів побудуємо за

допомогою функції середовища Matlab, в якому є функція $\text{fft}(x)$, яка вираховує для масиву даних x перетворення Фурь'є [6].

Вихідні осцилограми для сигналу $y = \sin^2 x$ та $y = \cos^2 x$ на проміжку від 0 до π та $y = -\sin^2 x$ та $y = -\cos^2 x$ на проміжку π до 2π та їх спектри, які показані на рис 3.8.

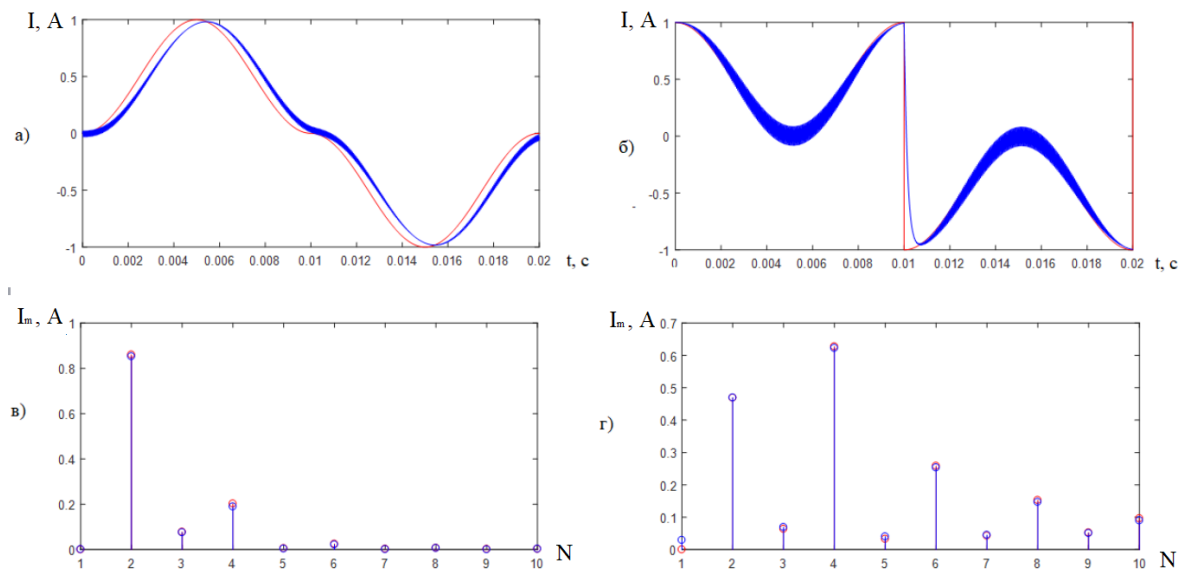


Рис 3.8 Осцилограми вихідного струму для сигналів та їх спектри :

а) $y = \sin^2 x$; б) $y = \cos^2 x$; в) спектр сигналу $y = \sin^2 x$; г) спектр сигналу $y = \cos^2 x$

На рис 3.9 зображено осцилограми та їх спектри для сигналів $y = \sin^2(x+\pi/4)$, $y = \cos^2(x+\pi/4)$ від 0 до π та $y = -\sin^2(x+\pi/4)$, $y = -\cos^2(x+\pi/4)$.

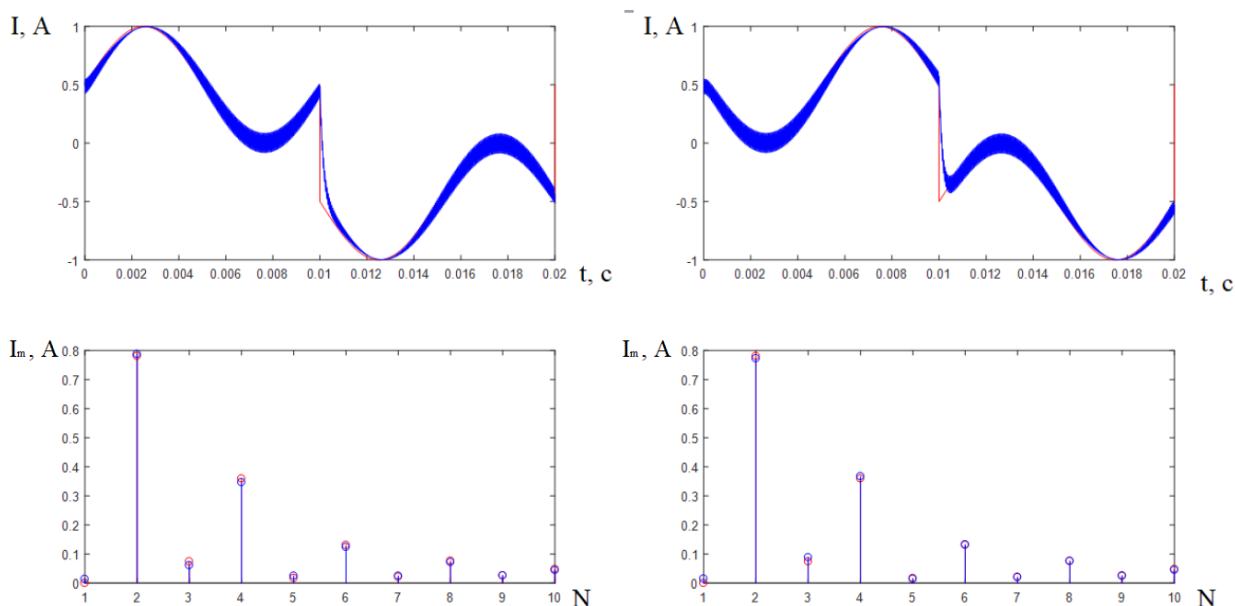


Рис 3.9 Осцилограми вихідного струму для сигналів та їх спектри :

а) $y = \sin^2(x+\pi/4)$; б) $y = \cos^2(x+\pi/4)$; в) спектр сигналу $y = \sin^2(x+\pi/4)$; г) спектр сигналу $y = \cos^2(x+\pi/4)$

Для релейного керування осцилограми струмів керування та їх спектри зображені на рис 3.10-3.11.

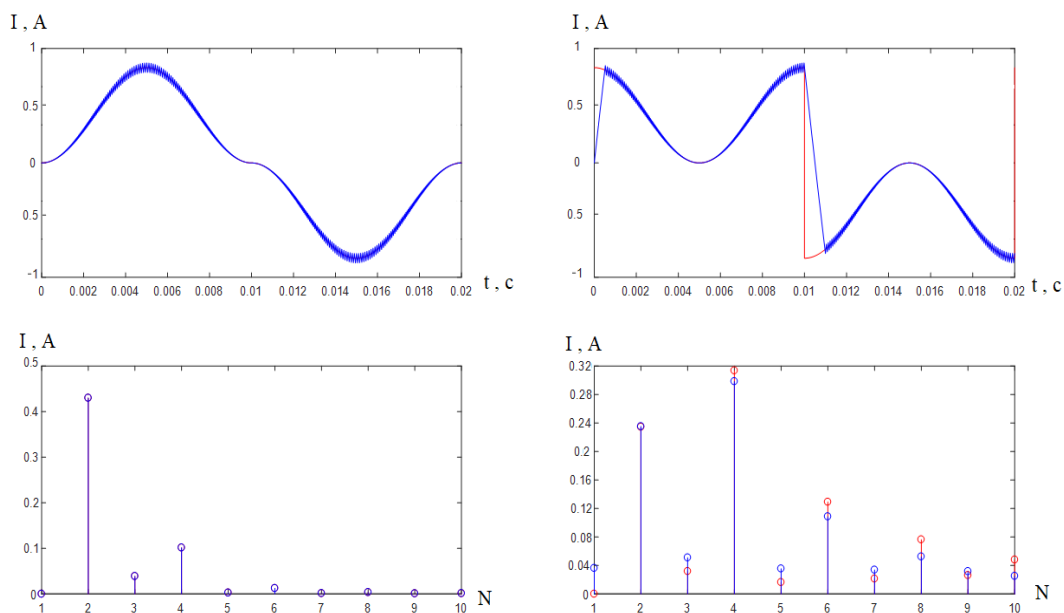


Рис 3.10 Осцилограми вихідного струму для релейного керування та їх спектри :

а) $y = \sin^2 x$; б) $y = \cos^2 x$; в) спектр сигналу $y = \sin^2 x$; г) спектр сигналу $y = \cos^2 x$

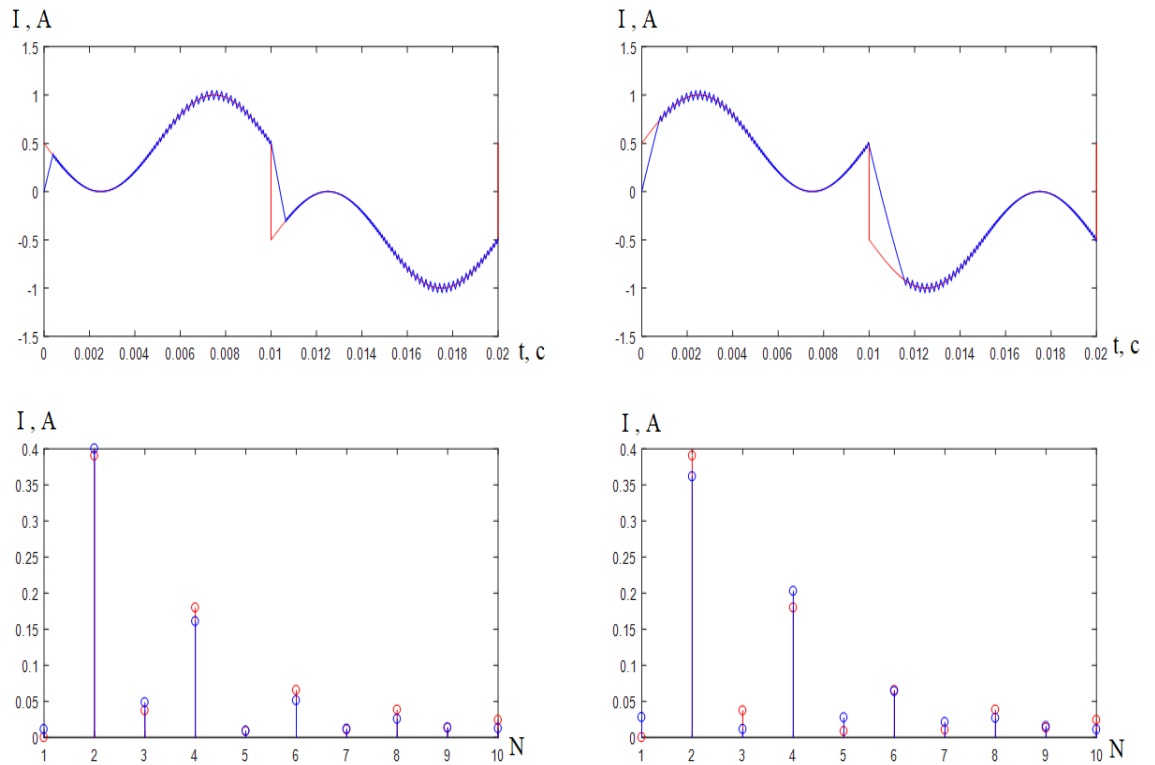


Рис 3.11 Осцилограми вихідного струму для релейного керування та їх спектри :

а) $y = \sin^2(x+\pi/4)$; б) $y = \cos^2(x+\pi/4)$; в) спектр сигналу $y = \sin^2(x+\pi/4)$; г) спектр сигналу $y = \cos^2(x+\pi/4)$

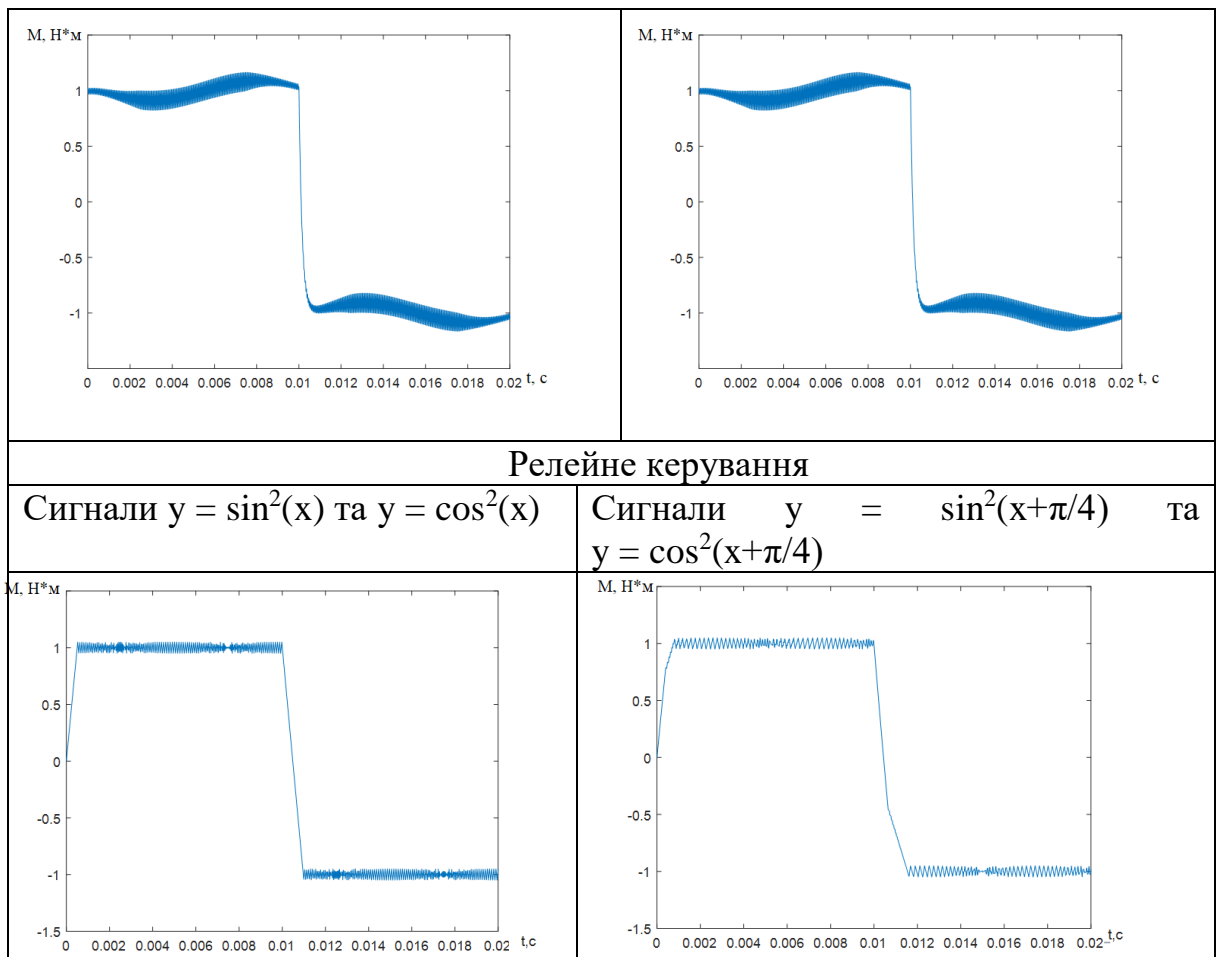
На отриманих осцилограмах струму зображено два сигнали - один синього кольору, а інший червоного. Червоним сигналом показана форму струму без втрат , тобто ідеальний випадок. Синім кольором зображено струм з виходу інвертора, що має певну величину пульсацій та відхилення.

Отримані осцилограми струму подаються на обмотки крокового двигуна, внаслідок чого двигун починає створювати магнітний момент. До табл. 3.1 занесено отримані сумарні моменти двигуна при різних методах керування та формі сигналів.

Таблиця 3.1

Моменти крокового двигуна при різних методах керування

| Метод ШІМ | |
|--|--|
| Сигнали $y = \sin^2(x)$ та $y = \cos^2(x)$ | Сигнали $y = \sin^2(x+\pi/4)$ та $y = \cos^2(x+\pi/4)$ |



Для обчислення величини середньоквадратичної похибки для струмів та моментів буде застосована формула

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^N (I_n - M(I))^2}{N}}, \quad (3.2)$$

де I_n - діюче значення струму, $M(I)$ - математичне очікування.

Математичне очікування являє собою середнє арифметичне значення значення струмів та реалізовується за допомогою функції Mean в середовищі Matlab. Лістинг для розрахунку середньоквадратичного відхилення наведений у Додатку 2.

Кількість імпульсів за період визначає динамічні втрати наскільки часто будуть відкриватися транзистори та внаслідок цього можна робити висновок про амплітуду пульсації моменту. Для ідеального випадку, величина зміни напрямку струму з додатного на від'ємний відбувається миттєво, проте на практиці дане явище не є можливим за індуктивності,

якою виступають обмотки двигуна. Тому чим меншим буде час переходу струму, тим швидше двигун буде змінювати полярність та мати меншу величину пульсації. Отримані внаслідок моделювання результати для всіх методів наведено у табл. 3.2 .

Таблиця 3.2

Порівняння методів керування кроковим двигуном

| Метод ШІМ | | | | | |
|-------------------------|--|--|--|-------------------------------|------------|
| Функція | Середньоквадратичне відхилення в часовій області | Середньоквадратичне відхилення в амплітудній області | Середньоквадратичне відхилення моменту двигуна | Кількість імпульсів за період | Час скачку |
| $y = \sin^2 x$ | 0.2178 | 6.4923e-05 | 0.0756 | 400 | - |
| $y = \cos^2 x$ | 0.2167 | 4,7677e-05 | | 400 | 696 мкс |
| $y = \sin^2(x + \pi/4)$ | 0.2177 | 3.8623e-05 | 0.0681 | 400 | 476 мкс |
| $y = \cos^2(x + \pi/4)$ | 0.2181 | 3,8638e-05 | | 400 | 370 мкс |
| Релейне керування | | | | | |
| Функція | Середньоквадратичне відхилення в часовій області | Середньоквадратичне відхилення в амплітудній області | Середньоквадратичне відхилення моменту двигуна | Кількість імпульсів за період | Час скачку |
| $y = \sin^2 x$ | 0.095 | 6.7799e-05 | 0.0639 | 8088 | - |
| $y = \cos^2 x$ | 0.0062 | 4.4218e-06 | | 8189 | 993 мкс |
| $y = \sin^2(x + \pi/4)$ | 0.1154 | 8.2772e-05 | 0.0587 | 5673 | 645 мкс |
| $y = \cos^2(x + \pi/4)$ | .0791 | 5.6179e-05 | | 5747 | 1.075 мс |

Висновки до третього розділу

З табл. 3.2 видно, що при порівнянні ШІМ методу та релейного керування з точки зору середньоквадратичної похибки видно, що її величина менша для релейного керування для амплітудної області, спектральної та сумарного моменту. Це говорить про те, що даний метод буде мати більшу точність і величина пульсації моменту, а отже і втрат, буде меншою ніж для ШІМ методу.

Величина стрибка струму з додатнього напрямку у від'ємний для ШІМ методу є меншою, що характеризує швидкодію при керуванні двигуном, а отже і більш плавну та стабільну роботу двигуна. Для цього

методу кількість імпульсів за період задається строго частотою несучого сигналу і визначається для кожної системи окремо, тому цю величину необхідно змінювати за допомогою каналів зворотнього зв'язку .

З огляду на всі критерії, найбільш оптимальним методом для керування кроковим двигуном є метод ШІМ , з використанням сигналів $u = \sin^2(x + \pi/4)$ та $u = \cos^2(x + \pi/4)$, так як вихідний момент має мінімальну величину пульсації струму та найменший час скачку струму.

4. РОЗРОБКА СТАРТАП - ПРОЕКТУ

Стартап як форма малого ризикового (венчурного) підприємництва впродовж останнього десятиліття набула широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу в ринок (із появою Інтернету як інструменту комунікацій та збуту стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, перетинати кордони між ринками різних країн), і вважається однією із наріжних складових інноваційної економіки, оскільки за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів загальна маса інноваційних ідей зростає.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Проте створення та ринкове впровадження стартап-проектів відзначається підвищеною мірою ризику, ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає від 10% до 20%. Ідея стартап-проекту, взята окремо, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за наявних ринкових умов.

Етапи розроблення стартап-проекту:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту

В межах цього етапу:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;

- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;
- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту.

2. Організація стартап-проекту

В межах цього етапу:

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;
- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;

- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;

- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту

В межах цього етапу:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;
- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);

- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

4. Заходи з комерціалізації проекту

Цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції (оферти). Він передбачає:

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;

- складання інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

Означені етапи, реалізовані послідовно та вчасно – створюють передумови для успішного ринкового старту.

4.1. Опис ідеї проекту

При розробці стартапу слід визначитися, в яких сферах можливе використання розробленого продукту та вигоди для користувачів.

В табл.4.1 наведені основні ідеї стартап-проекту.

Таблиця 4. 1.

Опис ідеї стартап - проекту

| <i>Зміст ідеї</i> | <i>Напрямки застосування</i> | <i>Вигоди для користувача</i> |
|---|--|---|
| <u>Зміст ідеї:</u> розробка методу керування кроковим двигуном ,що дозволяє мінімізувати пульсацію моменту на кроковому двигуні, внаслідок чого забезпечується рівномірність обертання двигуна та постійний тяговий момент. | 1. Інформаційні технології; | 1. Можливість програмування систем з використанням крокових двигунів та зміною їх параметрів. |
| | 2.Промисловість(для станків з ЧПУ) | 2.Для точного позиціонування керуючих механізмів |
| | 3.Годинники | 3.Для точного відображення годин ,хвилин та секунд. |
| | 4.Побутова техніка (принтери , 3-D друк) | 4.Для точного позиціонування керуючих механізмів. |

Перед запуском стартапу слід проаналізувати, які сильні, нейтральні та слабкі характеристики він має у порівнянні з конкурентами. Порівняння та аналіз цих характеристик наведено у табл.4.2.

Таблиця 4.2

Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

| № п/п | Техніко-ек ономічні характери стики ідеї | (потенційні) товари/концепції конкурентів | | | | W (слабка сторон а) | N (нейтра льна сторона) | S (сильн а сторо на) |
|----------|--|--|---|---|---|------------------------------|--------------------------------------|----------------------------------|
| | | Мій проект | Конкурент 1 | Конкурент 2 | Конкурент 3 | | | |
| 1. | Зміна парамет рів системи | Можливі сть зміни частоти модулю чого сигналу | Відсутні сть можливо стей зміни парамет рів | Відсутн ість можлив остей зміни параме трів | Відсутні сть можливо стей зміни парамет рів | | | + |
| 2. | Рівень пульсаці й струму на виході | Становит ь менше 5 %,тобто прилад є досить точним | Становит ь 10 % | Станов ить 15 % | Станови ть 10 % | | | + |
| 3. | Відобра ження даних для користу вача | Відсутні | Відсутні | Відсутн і | Наявні | + | | |
| 4. | Можлив ість вибору методу керуван ня для різних режимів роботи | Не має | Присутн я | Не має | Присутн я | + | | |

З табл.4.2 видно, що ідея має як свої переваги так і недоліки у порівнянні з конкурентами, тому під час реалізації самого приладу слід їх реалізувати.

4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В табл.4.3 наведено технологічну здійсненність ідеї проекту.

Таблиця 4.3

Технологічна здійсненність ідеї проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Ідея проекту</i> | <i>Технології її реалізації</i> | <i>Наявність технологій</i> | <i>Доступність технологій</i> |
|--|---|--|---------------------------------|-----------------------------------|
| 1 | Проведення комп'ютерного моделювання запропонованих методів. | Розробка, дослідження, програмування; | Наявна | Доступна |
| 2 | Обробка та аналіз результатів експериментальних даних, отриманих внаслідок моделювання, з метою виявлення найбільш доцільного алгоритму керування з точки зору пульсацій моменту. | Використання програмного середовища для порівняння сигналів за допомогою мір подібності. | Не наявна | Доступна |
| Обрана технологія реалізації ідеї проекту: самостійна розробка на основі дослідження | | | | |

Як видно з табл. 4.3 , для реалізації однієї частини проекту є готові та доступні технічні рішення, а з іншою частиною необхідні дослідження та самостійна розробка.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

В табл.4.4 приведена попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту.

Таблиця 4.4

Попередня характеристика потенційного ринку стартап проекту

| <i>№ n/n</i> | <i>Показники стану ринку (найменування)</i> | <i>Характеристика</i> |
|------------------|--|-----------------------------------|
| 1 | Кількість головних гравців, од | 30 |
| 2 | Загальний обсяг продаж, грн/ум.од | 250 |
| 3 | Динаміка ринку (якісна оцінка) | Зростає |
| 4 | Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень) | Відсутність масового виробника |
| 5 | Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації | Немає |
| 6 | Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), % | 40 |

На сьогоднішній день ринок для розробки систем керування кроковим двигуном не є переповненим, оскільки відсутній масовий виробник на території України. При запуску виробництва рентабельність для цієї галузі складатиме 40 %.

В табл.4.5 приведена характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту.

Таблиця 4.5.

Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

| <i>Потреба, що формує ринок</i> | <i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i> | <i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i> | <i>Вимоги споживачів до товару</i> |
|--|--|---|---|
| Точність вироблених деталей; Швидкість друку інформації на папері; Точність часу; Постійна величина обертового моменту; | Металообробна промисловість; Побутова промисловість ; Годинна промисловість; | Експлуатація як у динаміці так і у статиці, в різних, як складних, так і у умовах спокою; | - до продукції: Точність; Надійність; Дешевизна; Якість; - до компанії-постачальника: Точність; Брендінг та відомість; Гарантійність; |

Основною цільовою аудиторією для використання крокового двигуна є металообробна, побутова та годинна промисловість. Для того, щоб товар продавався на ринку, до нього головними критеріями є: точність, надійність та дешевизна. Во табл. 4.6 наведено основні фактори загроз, котрі можуть виникнути внаслідок реалізації стартапу.

Таблиця 4.5

Фактори загроз

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст загрози</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|--|---|--|
| 1 | Вартість виробництва | Досить висока вартість виробництва у порівнянні з аналогами. Багато світових аналогів. Необхідний підбір персоналу для створення системи керування. | Запустити виробництво оптом для здешевлення вартості. Найм кваліфікованих працівників. |
| 2 | Конкуренція | | |
| 3 | Можливість програмування та розрахунку системи | | |

Основною загрозою стартап-проекту виступає його висока вартість виробництва, оскільки його необхідно буде запускати з нуля. Окрім цього, якість продукції повинна бути не гіршої, ніж у світових конкурентів.

В табл.4.7 наведено основні фактори можливостей стартап-проекту.

Таблиця 4.6

Фактори можливостей

| <i>№ n/n</i> | <i>Фактор</i> | <i>Зміст можливості</i> | <i>Можлива реакція компанії</i> |
|------------------|----------------------------|--|--|
| 1 | Достовірність і надійність | Переваги при використанні ШІМ методу керування кроковим двигуном | Зроблений упор на маркетинг та рекламу у цих напрямках для рекомендації себе, як компанії, на ринку; |
| 2 | Безпомилковість | | |

За рахунок того, що для системи керування буде використовуватися ШІМ метод, сам прилад буде мати високу надійність та точність. Для запуску стартапу слід зробити упор на добру рекламну компанію, яка підкреслить ці фактори як головну перевагу над конкурентами.

В табл.4.8 наведено ступеневий аналіз конкуренції на ринку, за яким визначається як конкурентне середовище буде впливати на діяльність підприємства.

Таблиця 4.7

Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

| <i>Особливості конкурентного середовища</i> | <i>В чому проявляється дана характеристика</i> | <i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i> |
|--|---|---|
| 1. Тип конкуренції: чиста | В кого краще - в того купують | Покращення товару та сфери обслуговування |
| 2. За рівнем конкурентної боротьби: локальна | Належить до промислового ринку збуту; | Розширення функціоналу та орієнтації користувачів |
| 3. За галузевою ознакою: міжгалузева | Притаманна різним галузям застосування; | Розширення функціоналу та галузей застосування |
| 4. Конкуренція за видами товарів: товарно-родова та товарно-видова | Належить до аналізаторів стану людини | Розширення функціоналу пристрою |
| 5. За характером конкурентних переваг: цінова та нецінова | Чим дешевше – тим привабливіше; Чим краще – тим рентабельніше; | Покращення цінової політики та якості товару |
| 6. За інтенсивністю: не марочна | Не жорстка конкуренція | Агресивні та не агресивні форми піару |

Конкуренція на продаж запропонованої ідеї на території України не є жорсткою, проте для успішного продажу слід ставити ціну вище ніж у конкурентів лише за умови, що прилад буде кращим за всіма критеріями.

В табл.4.9 наведено аналіз стартапу за чотирма основними чинниками: сильною стороною, слабкою стороною, можливостями та загрозами. Такий аналіз називається SWOT-аналіз.

Таблиця 4.9.

SWOT- аналіз стартап-проекту

| | |
|---|--|
| Сильні сторони: Наявність постійного обертового моменту; Висока точність; Низький рівень пульсації моменту ; | Слабкі сторони: Можливість вибору методу керування для різних режимів роботи; Відображення даних для користувача ; |
| Можливості: Зміна параметрів системи ; Надійність та безпека роботи; | Загрози: Вартість виробництва ; Конкуренція |

4.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

В табл.4.10 наведено базову стратегії конкурентної поведінки.

Таблиця 4.10.

Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

| <i>№ n/n</i> | <i>Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?</i> | <i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i> | <i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i> | <i>Стратегія конкурентної поведінки*</i> |
|------------------|--|--|--|--|
| 1 | З погляду наявності системи керування кроковим двигуном - ні, з точки зору постійності моменту та його мінімального рівня пульсацій-так. | Буде шукати нових розширяючі функціонал і потенціал продукту, а також існуючі клієнти у конкурентів самовільно будуть використовувати більш кращий продукт | Ні, не буде, так як це зменшить клієнтську базу | Помірна, місцями агресивна |

Продукт не є першопроходцем на ринку в цілому, проте з точки зору мінімальної пульсації моменту - є, тому конкуренція саме за цим признаком буде повністю відсутньою. Розробка являє собою повністю унікальний продукт, тому за цього клієнтська база не буде зменшуватися. В табл.4.11 наведено ключові переваги концепції потенційного товару.

Таблиця 4.8

Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

| <i>№ п/ п</i> | <i>Потреба</i> | <i>Вигода, яку пропонує товар</i> | <i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i> |
|-----------------------|--|---|--|
| 1 | Виготовлення більш точної та надійної системи керування кроковим двигуном. | Отримання точного результату в тих приладах, в яких застосовується кроковий двигун. | Створення надійного бренду; Постійний розвиток та апгрейд системи та компанії у всіх напрямках; Заняття усіх можливих ніш у галузі електронних систем керування для створення монополії; Дотримуватися схеми ціна – якість; |

В табл.4.12 наведено межі встановленої ціни.

Таблиця 4.12

Визначення меж встановленої ціни

| <i>№ п/п</i> | <i>Рівень цін на товари-замі ники</i> | <i>Рівень цін на товари-ана логи</i> | <i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i> | <i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i> |
|------------------|---|--|---|--|
| | 120-140% від ціни нашого продукту | 170-180% від ціни нашого продукту | 35000 - 100000 грн зі 100 проданих од. | 200/800 грн |

В табл.4.13 наведено формування системи збуту внаслідок реалізації стартап-проекту.

Формування системи збуту

| <i>№ п/п</i> | <i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i> | <i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i> | <i>Глибина каналу збуту</i> | <i>Оптимальна система збуту</i> |
|------------------|---|---|--|---|
| 1 | Задоволення потреб, спрощення деяких функцій робітників в галузі металообробки та годинникової промисловості | Збут товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів | Усі можливі канали збуту (глибока) | Власна |
| 2 | | Збут та реклама товару та задоволення запитуваних потреб клієнтів | Усі можливі канали збуту (глибока) | Залучена |

Висновки до четвертого розділу

Згідно проведеного аналізу розроблюваний проект має можливість ринкової комерціалізації. Зростання попиту на аналогічні товари додає масовості придбання подібних гаджетів, але створює жорсткі конкурентні умови виходу на ринок, де динаміка ринку доволі сприятлива до розроблюваного проекту.

Проект має високі перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, якими виступають промислові, металообробні та годинникові промисловості. Бар'єрами входження на ринок можуть бути відсутності масового виробника, сильний конкурентний тиск з боку великих фірм аналогічних продуктів. Але якщо вести агресивну боротьбу в конкурентному середовищі, проект має великі шанси та можливість зарекомендувати бренд, де в подальшому здобудеться місце на ринковій економіці. Подальша імплементація проекту є доцільною та рентабельною.

ВИСНОВКИ

В роботі було реалізовано мікрокроковий режим роботи крокового двигуна, який має найбільшу точність позиціонування у порівнянні з іншими методами. Для цього режиму було змодульовано два варіанти генерації керуючого сигналу - ШІМ та релейне керування.

Після реалізації цих методів величина пульсації обертового моменту становила 5%, що говорить про низькі втрати при моделюванні системи. Методи порівнювалися між собою за такими параметрами : середньоквадратичне відхилення, час скачку та кількість імпульсів за період для знаходження оптимального варіанту керування.

Релейний метод керування мав перевагу в своїй точності, оскільки величина кількості імпульсів за період була значно вищою у порівнянні з ШІМ. Однак, час переходу та середньоквадратична похибка сумарного моменту такого методу становили більшу величину, ніж ШІМ, тому ШІМ має меншу величину пульсацій ніж релейне керування.

Зміщені один відносно одного сигнали на кут $\frac{\pi}{4}$ мають стрибок струму в обох обмотках, тому фронти сумарного моменту будуть мати симетричну форму, що і призводить до того, що час зміни полярності струму є найменшим серед усіх розглянутих методів.

Отже, для вирішення задачі розробки методу керування кроковим двигуном, із запропонованих методів - ШІМ метод з сигналами керування $\sin^2(x + \frac{\pi}{4})$ та $\cos^2(x + \frac{\pi}{4})$ є найоптимальнішим, оскільки величина пульсації для нього становитиме найменше значення.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Шаговые двигатели: учеб. Пособие / А.В. Емельянов, А.Н. Шилин / ВолгГТУ.- Волгоград, 2005.-329с
2. Белов М.П. Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов: Учебник для вузов. - М: Издательский центр «Академия», 2004.
3. Устройство и принцип работы двигателя на постоянных магнитах [Электронный ресурс] – Режим доступа до ресурсу: <http://slarkenergy.ru/oborudovanie/engine/na-postoyannyx-magnitax.html>.
4. Лекція:"Крокові двигуни" [Електронний ресурс] – Режим доступу до ресурсу: http://em.fea.kpi.ua/images/doc_stud/distsiplini/brem/BREM_Lekciya_10.pdf
5. Арменский Е.В. Фалк Г.Б. Электромеханические устройства автоматики: Учебное пособие / Московский государственный институт электроники и математики. М., 2002.Закладний О.М., Праховник А.В., Соловей О.І. Енергозбереження засобами промислового електропривода: Навчальний посібник. – К.: Кондор, 2005. – 408 с.
6. Дианов А. Микроконтроллеры для встраиваемых систем управления электроприводом. Серии «DashDSP» и «Mixed Signal DSP» фирмы Analog Devices // Электронные компоненты. 2003. №1
7. Корнеев В., Киселев А. Современные микропроцессоры., БХВ-Петербург 2012. 448 с.
8. Розодюк М. П., Козак М. О. Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи з дисципліни "Дослідження крокового двигуна". – Вінниця: ВНТУ, 37 с.
9. Коваленко І. О. Кроковий електропривод з векторним керуванням [Електронний ресурс] / І. О. Коваленко, М. О. Остапець, Т. О. Остапець – Режим доступу до ресурсу:

<http://epa.kpi.ua/wp-content/uploads/2016/02/15-KROKOVIIJ-ELEKTROPRIVOD-Z-VEKTORNIM-KERUVANNYAM.pdf>.

10. Дмитриев С. Н. Реализация микрошагового режима управления двигателем с применением микроконтроллера [Электронный ресурс] / С. Н. Дмитриев, А. В. Бурмитских, А. А. Левицкий – Режим доступа до ресурсу: <http://www.pandia.ru/text/78/177/14982.php>.

11. Московец П. А. Дослідження електроприводів постійного струму з імпульсними перетворювачами напруги [Електронний ресурс] / П. А. Московец. – 14. – Режим доступа до ресурсу: <http://masters.donntu.org/2013/etf/moskovets/diss/indexu.htm>.

12. Кенио Т. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления / Москва 1987. – 101 с.

13. Миронов С.И., Повалев В.П., Соломахин Г.В. Анализ методов структурного синтеза электропривода непосредственного действия // Электротехнические комплексы и системы управления - Современный электропривод. 2006. №1.

14. Виноградов А. Б., Чистосердов В. Л., Сибирцев А. Н. Частотно регулируемый электропривод переменного тока нового поколения // Привод и управление. 2000. № 0.

15. F.A. Toliyat, S.G. Campbell, «DSP-based electromechanical motion control», CRC Press, 2004.

16. Брусникин Д.Э. Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины В 2-х ч. Ч.2: Учебник для электротехн. спец. вузов. - 2-е изд. М.: Высш. шк. 1987.

17. Логинов А., Фадеев И. Применение DSP микроконтроллеров в управлении вентильными двигателями без датчика положения ротора // Электронные компоненты. 2003. №4

18. Шаговые двигатели и их микропроцессорные системы управления [Электронный ресурс] // asutpp. – 706. – Режим доступа до ресурсу: <https://www.asutpp.ru/elektrodvigatel/shagovyyj-dvigatel.html>.

19. Ратмиров В. А., и др. Системы с шаговыми двигателями, М.—Л., Издательство «Энергия», 1964, 136 с. с черт.

20. Векторное управление электродвигателем «на пальцах» [Электронный ресурс] // habr. – 16. – Режим доступа до ресурсу: https://habr.com/company/npf_vektor/blog/367653/.

21. Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors. // IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS,. – С. 292–300.

Лістинг програми для побудови спектрів сигналу

```
y = sin(x)*sin(x) ;  
u= sin(n*x) ;  
Mul = y*u ;  
result = Integrate [Mul, 0,2pi];  
plot[result, 0->50]
```

```
y = cos(x)*cos(x) ;  
u= sin(n*x) ;  
Mul = y*u ;  
result = Integrate [Mul, 0,2pi];  
plot[result, 0->50]
```

```
y = cos(x+pi/4)*cos(x+pi/4) ;  
u= sin(n*x) ;  
Mul = y*u ;  
result = Integrate [Mul, 0,2pi];  
plot[result, 0->50]
```

```
y = sin(x+pi/4)*sin(x+pi/4) ;  
u= sin(n*x) ;  
Mul = y*u ;  
result = Integrate [Mul, 0,2pi];  
plot[result, 0->50]
```

Лістинг програми для обчислень середньоквадратичної похибки

```

clc;
k=10;
dt=10^(-8);
t=0:dt:0.02;
fs=1/dt;

subplot(1,1,1);
L = length(qcosM);
T = (0:L-1)*dt;
NFFT = 2^nextpow2(L);
AqcosOrig = fft(qcosOrig,NFFT)/L;
AqsinOrig = fft(qsinOrig,NFFT)/L;
AqcosM = fft(qcosM,NFFT)/L;
AqsinM = fft(qsinM,NFFT)/L;

% f=(1/t(length(t)))*(0:length(A1)-1);
subplot(2,2,1);
plot(t,qcosOrig,'r',t,qcosM,'b');
subplot(2,2,3);
stem(1:k,abs(AqcosOrig(1:k)),'r'); hold on
stem(1:k,abs(AqcosM(1:k)),'b'); hold off
subplot(2,2,2);
plot(t,qsinOrig,'r',t,qsinM,'b');
subplot(2,2,4);
stem(1:k,abs(AqsinOrig(1:k)),'r'); hold on
stem(1:k,abs(AqsinM(1:k)),'b'); hold off
Delta_Orig_M_t=qcosOrig-qcosM;
mean_qcos_t=sum(Delta_Orig_M_t)/length(Delta_Orig_M_t);
SKV_qcos_t=sqrt(sum((Delta_Orig_M_t-mean_qcos_t).^2)/length(Delta_Orig_M_t))

Delta_Orig_M_A=AqcosOrig-AqcosM;
mean_qcos_A=mean(abs(Delta_Orig_M_A));
SKV_qcos_A=sqrt(sum((abs(Delta_Orig_M_A)-mean_qcos_A).^2)/length(Delta_Orig_M_A))

Delta_Orig_M_t=qsineOrig-qsineM;
mean_qsin_t=sum(Delta_Orig_M_t)/length(Delta_Orig_M_t);

```

```
SKV_qsin_t=sqrt(sum((Delta_Orig_M_t-mean_qsin_t).^2)/length(Delta_Orig_M_t))
```

```
Delta_Orig_M_A=AqsinOrig-AqsinM;  
mean_qsin_A=mean(abs(Delta_Orig_M_A));  
SKV_qsin_A=sqrt(sum((abs(Delta_Orig_M_A)-mean_qsin_A).^2)/length(Delta_Orig_M_A))
```

ABSTRACT

Urgency of work. Devices with digital signal processing are widely used in modern control systems. Digital control systems have led to the creation of a new type of actuators - stepping motors, which are widely used in printers, drives, faxes and in various industrial equipment, where the precise positioning of the device is a very important factor.

The basic methods of steering stepper motors are: full-stage, semi-step and micro-cycle modes. These modes of operation must perform switching of windings of the engine during its operation.

The engine control mode is selected depending on the practical task to be implemented. After selecting the mode, it is necessary to select and implement a step-motor winding control algorithm. The main parameter, by which one can analyze the control algorithm, is the moment of the engine, which for constant operation should have a constant value in the winding and the minimum value of the ripple. The problem with the currently known algorithms of control is that the engine moment is not constant, it has a very significant amount of pulsations at the output moment, which makes it impossible to precisely position the device. Therefore, the creation of a step-by-step engine control method with a minimum value of the pulsation of the starting point is an actual task for today.

Relationship of work with scientific programs, plans, themes

The work was performed at the National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" at the department of industrial electronics in the framework of the initiative research work

The purpose and tasks of the research.

The purpose of the dissertation is to analyze existing methods of stepper motor control and to develop a constant-magnitude torque algorithm with a minimum level of ripple.

The main tasks of the research are:

- 1) computer simulation of the proposed methods;
- 2) processing and analysis of the results of experimental data obtained as a result of simulation, in order to identify the most appropriate control algorithm in terms of momentum pulsations.

Subject of research - a way to reduce the momentum pulsation.

The object of the study is a method of controlling a stepper motor with a reduced pulsation moment.

Research methods. The theory of electric circuits and the theory of information processing of signals using mathematical measures of similarity were used for their further analysis, when solving the tasks set in the work for the implementation of the stepping motor control method with the minimum level of pulsation of the torque moment,. The system simulation and its analysis were carried out in the software package Matlab Simulink.

The scientific novelty of the research is as follows:

- 1) a method for controlling the stepped motor with reduced pulsation has been developed;
- 2) the PIM method of modulation with a variable frequency of the bearing function is proposed for providing a constant current ripple coefficient.

The practical value of the results obtained:

- 1) There is a moment of engine pulsation at the level of 5 percent or less.
- 2) The dynamic losses of the inverter's transistor are minimized by changing the frequency of the PWM carrier function.

Approval of the results of work. The results of the dissertation researches were reported and discussed at the XI International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics-2018", Kyiv.

Publications The main provisions and results obtained in the dissertation work were described in the following works:

1. Mozharovskyi D.O. Wireless transmission and processing of information for the SmartGrid system / Collection of articles of the XI INTERNATIONAL SCIENTIFIC-TECHNOLOGICAL CONFERENCE OF

NEW TEACHERS ELECTRONICS-2018. Section "Converting and microprocessor technology", 2018.- p. 316-319.

2.Mozharovskyi D.O. Yamnenko Yu.S. Primary processing and identification of biometric information from the pulse sensor. / Scientific notes of the Taurida National University named after VI Vernadsky. - 2018. - P. 116-121.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, four sections, conclusions, list of used sources from 21 titles. The total volume of the dissertation paper is 87 pages, including 79 pages of the main text of 51 drawings and 21 tables.